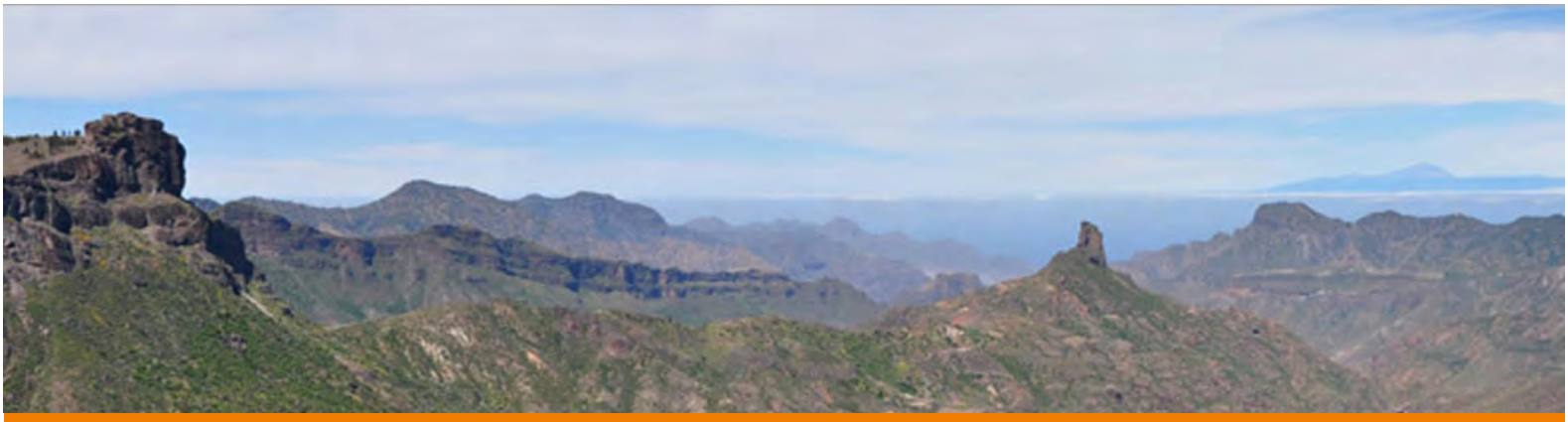
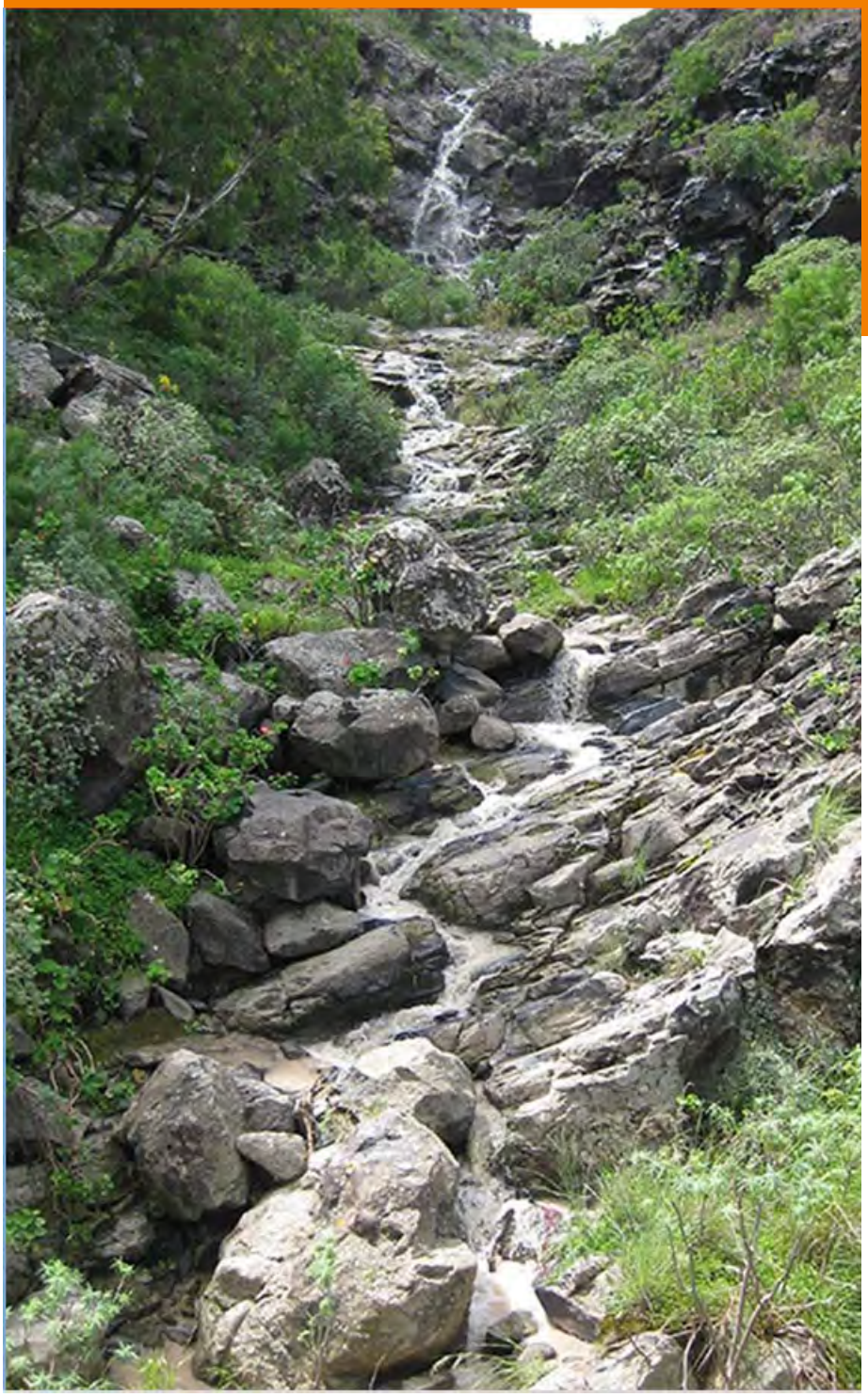




II WORKSHOP

"ESTUDIO, APROVECHAMIENTO Y GESTIÓN DEL AGUA EN TERRENOS E ISLAS VOLCÁNICAS"

Actas del II Workshop celebrado en Las Palmas de Gran Canaria del 21 al 23 de enero de 2015

María del Carmen Cabrera, Tatiana Cruz-Fuentes, Vanessa Mendoza-Grimón y María del Pino Palacios-Díaz (Editoras)

Las Palmas de Gran Canaria

21 al 23 de enero de 2015

Título: ESTUDIO, APROVECHAMIENTO Y GESTIÓN DEL AGUA EN TERRENOS E ISLAS VOLCÁNICAS

Actas del II Workshop celebrado en Las Palmas de Gran Canaria del 21 al 23 de enero de 2015

Editoras: M.C. Cabrera; T. Cruz-Fuentes; V. Mendoza-Grimón y M.P. Palacios-Díaz

1 CD, 12 cm

© Instituto Geológico y Minero de España
© Asociación Internacional de Hidrogeólogos – Grupo Español
Aih_ge@aih-ge.org

Tratamiento informático: Telemática Avanzada Canaria (TAC7)
ISBN: 978-84-938046-4-0
Depósito Legal: GC 1208-2014

PRÓLOGO

Las islas volcánicas son territorios aislados y con frecuencia densamente habitados en las que la obtención de recursos hídricos presenta características y problemáticas peculiares. Las Islas Canarias son un ejemplo de territorio en medio volcánico en unas condiciones climáticas de semiaridez donde se ha desarrollado un sistema complejo de obtención y manejo del agua. En este entorno, la tecnología asociada a la producción de los recursos no convencionales, los estudios sobre su aprovechamiento sostenible y los avances sobre cómo optimizar su gestión pueden ser transferidos a otras islas con menor experiencia en su uso. Al mismo tiempo, los conocimientos sobre cómo conservar la cantidad pero, sobre todo, la calidad de los recursos convencionales se fundamentan en la comprensión del ciclo hidrológico, siendo fundamental el estudio de las aguas subterráneas que siguen constituyendo la principal fuente de los recursos disponibles en la mayoría de las islas.

En respuesta a esta problemática, la Universidad de La Laguna celebró en noviembre de 2012 un Workshop que tuvo un rotundo éxito de participación y debate. Por este motivo se decidió dotar a las jornadas de su nuevo carácter periódico y fomentar la importancia dedicada al debate, incrementando la presencia social en las mismas e incorporando parcialmente el formato de mesa redonda. En este contexto se celebra el II Workshop en Las Palmas de Gran Canaria entre el 21 y el 23 de enero de 2014, bajo el título "Estudio, Aprovechamiento y gestión del agua en terrenos e islas volcánicas", organizado por el grupo de investigación GEOVOL de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Los principales objetivos de las jornadas son divulgar y poner en común todos aquellos aspectos relevantes de la obtención, disponibilidad, calidad, aprovechamiento y gestión de un recurso absolutamente necesario como es el agua en terrenos e islas volcánicas. En este evento se ha dado voz a todos los actores que participan en las decisiones sobre la gestión integral del agua para potenciar el uso sostenible de este recurso, porque para resolver el problema del agua no es sólo producir agua o captarla, sino gestionarla de manera sostenible, justa y eficaz. Por ello, se invitó a participar a esta reunión científica a todas las personas interesadas e involucradas en el sector para que presenten sus ideas. Con la riqueza de la diversidad de planteamientos avanzaremos sólidamente en nuestros conocimientos, sirviendo a la sociedad que nos sustenta.

El presente libro digital recoge las comunicaciones presentadas al Workshop, después de un cuidadoso proceso de revisión por parte de los expertos del Comité Científico, a los que las editoras agradecen su labor. Representa un mosaico de propuestas que abordan la complejidad del tema bajo diferentes puntos de vista y que sólo contemplado en su integridad adquiere su entidad completa. Las comunicaciones aceptadas están divididas en cuatro áreas temáticas: Gestión, Caracterización de los recursos naturales, Recursos no convencionales y Agua y salud. Estas áreas representan un amplio abanico de temas, evidenciando el marcado carácter pluridisciplinar que tiene el agua, no solamente como recurso sino también como bien cultural.

El Workshop ha tenido una amplia acogida entre profesionales ligados a diferentes campos, que se ha traducido en 50 comunicaciones distribuidas en las cuatro áreas temáticas. La edición se ha llevado a cabo por el Instituto Geológico y Minero de España y el

Grupo Español de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos. Para su celebración, se ha contado con los apoyos económicos de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, los Consejos Insulares de Agua de Gran Canaria y Tenerife, ELMASA, la Asociación de Empresarios de Actividades Hidráulicas, la Comunidad de Regantes del Norte de Gran Canaria, la empresa Bonny, la Heredad de Aguas de Arucas y Firgas y la empresa ATHidrotecnia. Además, han colaborado activamente el Instituto Tecnológico de Canarias, el IMDEA-Agua, el Colegio de Ingenieros de Montes y el Colegio Oficial de Ingenieros Agrónomos de Centro y Canarias.

Las editoras deseamos que la celebración de este Workshop y este libro digital sean un punto de encuentro para el intercambio de puntos de vista y de conocimientos científicos, técnicos, económicos, sociales y administrativos del agua, no solamente en Canarias, sino en los entornos volcánicos en general, ya que la experiencia adquirida en nuestro archipiélago puede extrapolarse a otras regiones. Por ello, sería deseable que constituyan un punto de partida para la coordinación de esfuerzos en investigación en islas volcánicas con problemáticas similares.

Las editoras

ÍNDICE

Área Temática 1 – Gestión: Planificación, Economía y aspectos normativos

R. Bolivar
La gestión indirecta del ciclo integral del agua en Las Palmas de Gran Canaria. Situación actual y perspectivas para el periodo de concesión restante …….. 13

A. Bueno García y D. Cárdenes Macías
"Entre piedra y agua": estudio y propuestas para la Vega de San Lorenzo…….. 21

E. Custodio
Comentarios sobre el Proyecto MASE en Canarias…….. 29

T. Cruz-Fuentes, M.C. Cabrera, J. Heredia y E. Custodio
La explotación del acuífero de La Aldea (Gran Canaria) desde el punto de vista de la Directiva Marco del Agua…… 37

E. Custodio, M.C. Cabrera, R. Poncela y L. O. Puga de Miguel
Comentarios sobre la incertidumbre en el conocimiento y gobernanza de las aguas subterráneas en Canarias …… 45

J. C. Fontes, F. C. Rodrigues y J.C. Santamarta
Disponibilidad de Recursos Hídricos Superficiales y Subterráneos en la Isla de Terceira (Azores)…… 53

G. Martel Rodriguez, B. Peñate Suarez y J. R. Betancort Rodriguez
Aportaciones de Canarias al sector del agua y saneamiento en Cabo Verde (2010-2014)……..... 61

A. Morales González-Moro y R. J. Lario Báscones
Aprovechamientos de aguas subterráneas en Canarias. Retos de futuro en cuanto a la normativa de seguridad…….. 69

E. J. Moreno Deus
Balance hídrico en el Plan Hidrológico de Gran Canaria…….. 77

M. P. Palacios-Díaz, V. Mendoza-Grimón y A. del Villar García
Influencia de las decisiones políticas en la rentabilidad del riego con aguas regeneradas……..... 85

J. M. Palerm
Arquitectura y Paisaje del Agua……. 93

Y. Pérez Guzmán, T. Morant de Diego, L. Hernández Calvento, V. Mendoza Grimón y M. P. Palacios-Díaz
Dónde reutilizar y qué regar: uso de un GIS para el diseño de una red de reutilización en una isla volcánica……. 101

C. Soler Liceras, M. Hernández Andreu y M. Á. Sicilia de Paz
Sistema de almacenamiento y regulación de caudales en las galerias mediante cierres con compuerta en los diques volcánicos……. 109

J.C. Santamarta, I. Ruiz-Rosa, J.C. Fontes y F.C. Rodrigues
Principios y Retos de la Gestión del Agua en la Región de la Macaronesia……. 117

A. I. Santana Armas, M.C. Cabrera y F.J. Pérez-Torrado
Ideas preconcebidas sobre el ciclo del agua y las aguas subterráneas en la educación secundaria de Canarias…….. 125

M. Suárez Bosa
La gestión del agua en Cabo Verde, entre lo privado y lo colectivo…….. 133

F.J. Toledo Marante
Análisis de la materia orgánica disuelta en el agua: aplicación de la resonancia magnética nuclear (1H-NMR)…… 141

Área temática 2 - Caracterización de los recursos naturales: aguas subterráneas y superficiales

H. Alonso-Hernández, T. Cruz-Fuentes, A. Rodriguez-Gonzalez, J. González-Guerra, M. Á. Arnedo-Ayensa, P. Martel-Escobar, A. Tejera-Cruz, M. C. Cabrera, F.J. Pérez-Torrado y J. García-Rubiano
Contenido de Radón en aguas subterráneas del Norte de Gran Canaria……..... 151

J. J. Coello Bravo, R. Balcells Herrera, I. Farrujia de la Rosa, C. García Reino y J. Fernández Bethencourt
Hidrogeología de los Nacientes de Abinque (Adeje, S de Tenerife). Primeros resultados…. 159

N. Crespo, E. Custodio y E. Vázquez-Suñé
Caracterización hidrogeológica y modelización de flujo del Acuífero de Los Rodeos (Tenerife)…….... 167

C. Criado Hernández, M. Arnay de La Rosa, E. González Reimers, J. F. Navarro Mederos, C. García Ávila, E. Marrero Salas y S. Pou Hernández
Recursos hídricos y poblamiento pre-Hispánico en las Cañadas del Teide (Tenerife)…… 175

F. Díaz, M. Tejedor, C. Jiménez y J..M. Hernández-Moreno
Calidad de las aguas superficiales afectadas por un incendio forestal (La Gomera 2012)… 183

C. Herrera, E. Custodio, J. Urrutia, H. Urqueta, A. Sarmiento y C. Gamboa
Caracterización de las aguas subterráneas de una pequeña cuenca endorreica del Altiplano del norte de Chile…… 191

M. Himi, E. Estévez, R. Lovera, A. Sendrós, MP. Palacios-Diaz, JC. Tapias, MC. Cabrera y A. Casas
Ensayo de correlación entre parámetros geofísicos e hidrogeológicos de los depósitos volcánicos de la Caldera de Bandama (Gran Canaria)…… 199

R. Marrero Diaz, N. M. Pérez, G. V. Melián, E. Padrón, G. D. Padilla y F. J. Alcalá
Estimación de la recarga a través del balance de masa de cloruro atmosférico en la Caldera de Las Cañadas, Tenerife, Islas Canarias…… 207

S. Martos-Rosillo, R. Morales García, A. García de Domingo, L. Fernández Ruiz y J. J. Durán Valsero
Modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico del sector del Roque de los Muchachos (Acuífero de Las Vertientes) en la isla de La Palma, Canarias……. 215

P. Máyer Suárez, M. V. Marzol Jaén y J. M. Parreño Castellano
Tendencias de la precipitación en Canarias……. 223

S. Montesdeoca-Esponda, E. Estévez-Navarro, M. C. Cabrera, Z. Sosa-Ferrera y J. Juan Santana-Rodríguez
Determinación de contaminantes emergentes en aguas subterráneas del noreste de Gran Canaria……... 231

R. Morales García, S. Martos-Rosillo, A. García de Domingo, L. Fernández Ruiz y J. J. Durán Valsero
La incidencia del vertido de aguas residuales domésticas de las instalaciones del Instituto Astrofísico de Canarias en el Roque de Los Muchachos (La Palma, Canarias) sobre las aguas subterráneas. Método de estudio y resultados…….. 239

G. Naranjo, M. C. Cabrera, T. Cruz-Fuentes, L. F. Martín y E. Custodio
Cuantificación de la recarga natural al acuífero del norte de Gran Canaria…….. 247

R. Poncela Poncela, E. Skupien Balon, Á. Morales González-Moro, R. Lario Báscones y J. C. Santamarta Cerezal
Caracterización hidroquímica e isotópica de las aguas subterráneas alumbradas en los nacientes La Mina y El Molinillo (T.M. Tejeda, Gran Canaria)……. 255

A. Ritter, C. M. Regalado y J. C. Guerra
Cuantificación de la captación de agua de niebla en tres localizaciones de Tenerife……. 263

J.C. Santamarta, F.C. Rodrigues y S. Quadros.
El Flúor en las Aguas de Abastecimiento de la Región de la Macaronesia: Planteamiento del Problema y Vías de Investigación Abiertas…….. 271

J. I. Santana Ramírez
La Fuente Pública de Telde……... 279

C. Soler Liceras, M. Hernández Andreu y M. Á. Sicilia de Paz
El descubrimiento y la recuperación de la Fuente Santa en la isla de La Palma……. 287

B. Vittecoq
Contribución de los estudios electromagnéticos aeroportados (HTEM) a la caracterización hidrogeológica de islas volcánicas: revisión de las últimas investigaciones…… 295

B. Vittecoq, J. Deparis, S. Violette, T. Jaouën, F. Lacquement, R. Coulomb, A.Gutierrez y M. Parizot
Validación del modelo hidrogeológico conceptual de la isla de Moyotte mediante la perforación de ocho pozos……. 303

M. Rejas, R. A. Gil, L. D. Martinez, J. Saavedra y J. L. Fernandez-Turiel
Ventajas y desventajas de la aplicación de la técnica de HR-ICP-MS al análisis inorgánico de aguas en terrenos volcánicos…….. 311

I. Iribarren
Modelos geológicos en 3D de la isla de Tenerife…….. 313

Área temática 3 – Recursos no convencionales: aguas desaladas y depuradas

C. Afonso-Olivares, R. Guedes-Alonso, S. Montesdeoca-Esponda, Z. Sosa-Ferrera y J. J. Santana-Rodríguez
Evaluación de la presencia de compuestos farmacéuticos en aguas residuales procedentes de Estaciones de Depuración de Aguas Residuales (EDARs) de la isla de Gran Canaria..... 317

A. Borreguero Fabelo, J. A. Herrera Melián, J. Araña Mesa y A. Ortega Méndez
Estudio del uso de triturado de palmera como sustrato de humedales de tratamiento de aguas residuales…….. 325

J. Castellano Vera, J. Vaswani Reboso y B. Peñate Suárez
Aportaciones de la nanotecnología a los tratamientos del agua. Casos prácticos para Canarias……. 333

N. Falcón Cardona, V. Mendoza-Grimón, J. R. Fernández-Vera, I. Hernández Brito y M.P. Palacios-Díaz
Caracterización del comportamiento hidráulico y químico del picón como material para la depuración natural del estiércol líquido de rumiantes…… 341

C. Fernández Rodríguez, C. Afonso Olivares, A. Martín González, R. J. Ojeda González, O. Domínguez Santana, J. J. Santana Rodríguez, P. Susial, y J. M. Doña Rodríguez
Eliminación de microcontaminantes orgánicos mediante tratamientos avanzados para un uso potable indirecto de aguas regeneradas……..…… 349

V. Mendoza-Grimón, J. M. Hernández-Moreno, y M. P. Palacios-Díaz
Mejora del aprovechamiento del agua en la producción de forrajes……... 357

F. A. Ojeda Pérez
Otros apuntes para la historia de la desalación en Canarias……..…. 365

M. P. Palacios-Díaz, V. Mendoza-Grimón, I. Hernández Brito y J. R. Fernández-Vera
El agua regenerada y la producción de Biocombustibles…… 373

C. J. Santana Delgado
Evolución del recurso de la desalación en Gran Canaria…… 381

L. Vera Peña, E. González Cabrera, O. Díaz López, R. D. Sánchez Rodríguez y R. A. Bohorque Bohorque
Regeneración de efluentes secundarios mediante ultrafiltración por membranas de fibra hueca sumergidas. Optimización de la duración de los ciclos de filtración…… 389

M. Hernández
Sobre la gestión de la calidad del agua en hoteles y resorts……..……. 397

Área temática 4 – Agua y Salud: desde las aguas Mineromedicinales hasta la prevención de riesgos y epidemias

R. Guedes-Alonso, Z. Sosa-Ferrera y J. J. Santana-Rodríguez
Determinación de hormonas esteroideas en aguas depuradas de la isla de Gran Canaria…….. 401

M. M. Martín Delgado, M. L. Pita Toledo, J. Campos Díaz y E. Fierro Peral
Influencia del origen volcánico de los recursos hídricos y la calidad química del agua de consumo humano en las Islas Canarias…….…. 409

M. T. Tejedor-Junco, M. González Martín, P. Lupiola Gómez, E. Estévez Navarro, M. C. Cabrera y S. Montesdeoca Esponda
Resistencia a antibióticos en bacterias aisladas de muestras de agua en Gran Canaria y su relación con la presencia de contaminantes emergentes……...… 417

F. A. Ojeda Pérez
La Vuelta al Mundo a través de Ochenta etiquetas de agua embotellada……. 425

ÁREA TEMÁTICA 1

GESTIÓN, PLANICACIÓN, ECONOMÍA Y ASPECTOS NORMATIVOS

ISBN: 978-84-938046-4-0

LA GESTION INDIRECTA DEL CICLO INTEGRAL DEL AGUA EN LAS PALMAS DE GRAN CANARIA: SITUACION ACTUAL Y PERSPECTIVAS PARA EL PERIODO DE CONCESION RESTANTE

Rafael BOLIVAR TOLEDO[1]

[1] Ayuntamiento de Las Palmas de Gran Canaria. rbolivar@laspalmasgc.es

RESUMEN

En 1992 el Ayuntamiento de Las Palmas de Gran Canaria adoptó una serie de decisiones en materia de aguas que han determinado el devenir de su gestión. Se unificó la gestión de los servicios públicos municipales; se modificó el sistema de gestión, pasando a la gestión indirecta mediante una empresa de economía mixta, que durará 50 años, así como el uso de los bienes de dominio público afectos y se impulsó la creación de tres consorcios: uno con el Ayuntamiento de Telde para la renovación de la planta potabilizadora de Las Palmas I; otro de distribución de agua con los municipios limítrofes y el último de producción de agua, así como de apoyo en la participación de EMALSA en los concursos de explotación de plantas depuradoras a escala insular. Hoy, casi 25 años después de este acuerdo, la gestión del ciclo integral del agua se enfrenta a graves problemas y desafíos que han dado lugar a la intervención municipal. La presente comunicación pretende describir los principales hitos ocurridos en el transcurso de la concesión, la evolución de los parámetros que caracterizan el ciclo integral del agua de Las Palmas de Gran Canaria, así como analizar diferentes escenarios hasta su finalización en el año 2043.

Palabras clave: *Gestión, Concesión, Ciclo Integral, Intervención, Las Palmas de Gran Canaria.*

ABSTRACT

In 1992 the Municipality of Las Palmas de Gran Canaria took several decisions related to water services which have been capital for its future management. The management of the public local services was unified; the management system was modified towards indirect management, through a mixed economy company, lasting 50 years, as well the use of the goods of public domain related and the creation of three consortiums was encouraged: one of them with Telde municipality for the renewal of the water treatment plant of Las Palmas I; another about water distribution with the adjacent municipalities; and the last one about water production, in order to support EMALSA's participation in the tendering processes for the use of insular water treatment plants.Today, near to 25 years after the agreement, the water life cycle management is facing great problems and challenges which have led to the Municipal intervention. This communication tries to expose the main milestones happened during the license, the development of the factors of the water life cycle, as well as to analyze several scenarios till its end in 2043.

Key words: *Management, License, Integrated cycle, Intervention, Las Palmas de Gran Canaria.*

INTRODUCCIÓN

El 30 de julio de 1992, el Pleno del Ayuntamiento de Las Palmas de Gran Canaria (LPGC) adoptó una serie de acuerdos en materia de aguas que han determinado el devenir de la gestión de este recurso esencial. En síntesis, las principales decisiones a escala municipal fueron:

- Unificar la gestión de los servicios públicos municipales relativos al agua. (Producción, abastecimiento, saneamiento, depuración y vertido).
- Modificar el sistema de gestión de tales servicios, pasando a la forma de gestión indirecta mediante una empresa de economía mixta. Dicha empresa será EMALSA (en ese momento 100% pública). El nuevo sistema de gestión durará 50 años a partir de la venta de acciones en escritura pública.
- Valorar la concesión de uso, por 50 años, de los bienes de dominio público afectos en una cantidad próxima a 3.000.000.000 de Ptas.
- Aprobar un pliego de Cláusulas Administrativas Provisionales para el concurso de compraventa de entre el 49% y el 66% de las acciones de EMALSA.
- Conceder a EMALSA el uso de los bienes de dominio público afectos a la gestión del ciclo integral del agua por un periodo de 50 años y sujeto a una serie de condicionantes.

A escala insular, se tomaron las siguientes decisiones:

- Impulsar la creación de un consorcio con el Ayuntamiento de Telde para la renovación de la planta potabilizadora de Las Palmas I. Decidir que dicha remodelación deberá mantener el sistema de cogeneración existente.
- Impulsar la creación de un consorcio de distribución de agua con los municipios limítrofes.
- Impulsar la creación de un consorcio de producción de agua, cuya base sería Las Palmas I reconvertida.
- Apoyar la participación de EMALSA en el concurso para la explotación de plantas depuradoras a escala insular.

Ninguno de dichos acuerdos, salvo el de la valoración de la concesión, contó con informes técnicos. El resultado de organizar los acuerdos mencionados según su naturaleza principal, técnica o política, hubiese sido el mismo que el relacionado con el ámbito geográfico expuesto. Todos los de naturaleza técnica, o de escala municipal, con mayor o menor retraso, se han realizado. Ninguno de naturaleza política, o de escala insular, se ha llevado a efecto.

EL CICLO INTEGRAL DEL AGUA EN LPGC. PRINCIPALES PARÁMETROS.

A nivel esquemático, la Figura 1 ilustra el Ciclo Integral del Agua en Las Palmas de Gran Canaria. La evolución de los principales parámetros en el área de abastecimiento se muestra en la tabla 2.

Por lo que se refiere a los servicios de depuración desde la principal depuradora, la EDAR de Barranco Seco, la evolución del volumen anual tratado en relación con el agua llegada a la EBAR del Teatro y más recientemente con el colector interceptor, queda como se refleja en la tabla 1.

Figura 1. Ciclo integral del agua en LPGC (elaboración propia).

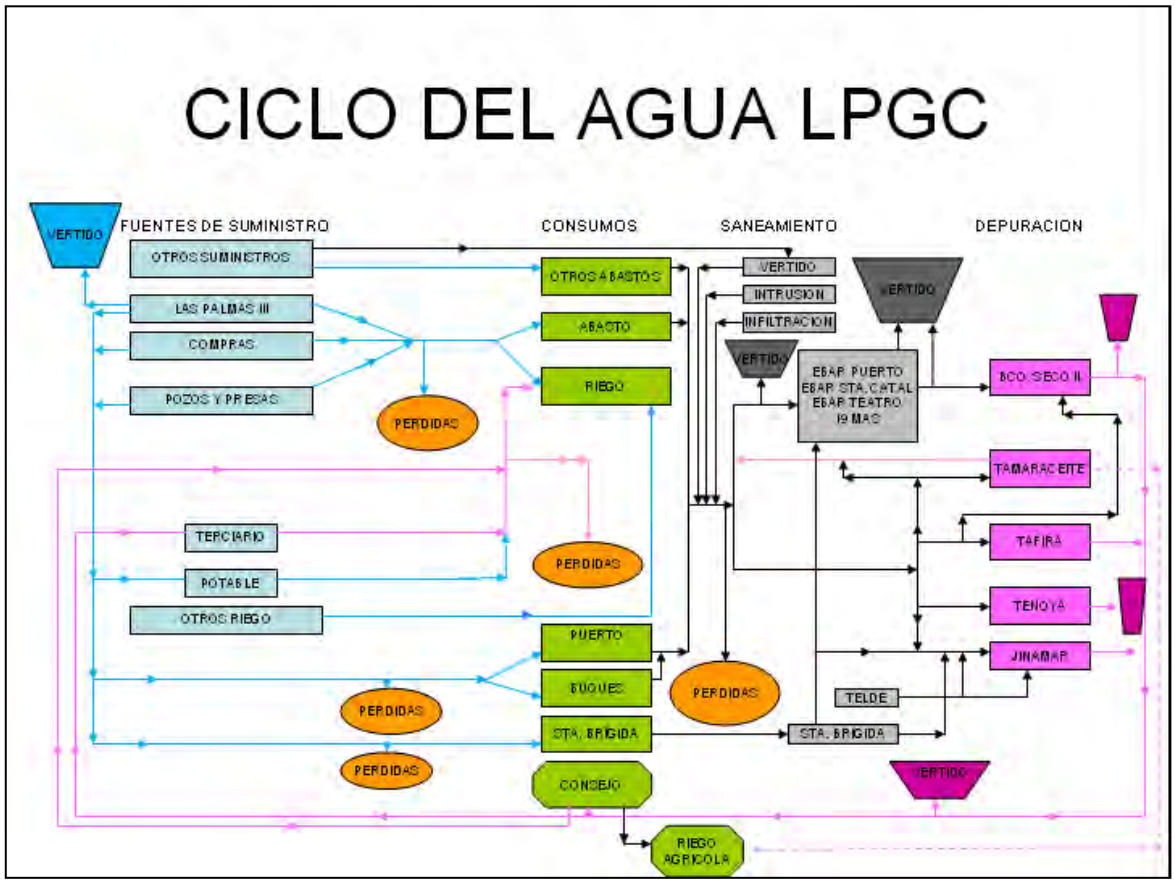


Tabla 1. Volumen anual tratado en la EDAR Barranco Seco en relación con el agua llegada a la EBAR del Teatro (Fuente: EMALSA. Informes mensuales de gestión de varios años).

M3*1.000/año	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004(*)	2005(*)	2006(*)	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014(*)
EBAR Teatro	16.060	16.443	16.186	16.254	17.300	18.895	19.250	17.589	17.314	16.983	16.306	16.382	17.350	16.495	15.790	15.358	14.566
Interceptor																595	2.421
Total EBAR Teatro + Interceptor	16.060	16.443	16.186	16.254	17.300	18.895	19.250	17.589	17.314	16.983	16.306	16.382	17.350	16.495	15.790	15.953	16.987
EDAR Bco Seco	6.437	6.224	6.453	7.289	7.206	7.935	8.465	8.994	9.524	10.241	10.269	9.408	10.488	11.085	12.818	12.804	14.878
Volumen no tratado	9.623	10.219	9.733	8.965	10.094	10.960	10.785	8.595	7.790	6.742	6.037	6.974	6.862	5.410	2.972	3.149	2.109

Para el conjunto de las depuradoras incluidas en el contrato de depuración de 1998 entre el Ayuntamiento y EMALSA (Barranco Seco, Fondillo o Tafira, Tamaraceite y Tenoya) la evolución de la comparación entre el caudal base del cálculo del precio del mismo y las cantidades realmente depuradas se recogen en la tabla 3.

En síntesis, el recorrido administrativo de la concesión se inicia en 1992 con el acuerdo de unificación de la gestión de los servicios y su concesión a EMALSA en ese momento 100% pública; la escritura de compraventa se eleva a pública en 1993, una vez resuelto el concurso por el que se adjudicó el 66% de las acciones de EMALSA; mientras que el contrato de gestión de los servicios de saneamiento y depuración se firma en 1998.

Tabla 2. Distribución de recursos en abastecimiento (Fuente: informes de propuesta de modificaciones de tarifas de ELMASA durante varios años. Últimos años de comunicación personal).

	2001	2002	2003	2004	2005	2.006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
VOLUMEN PRODUCIDO:														
Desaladora LP-I.	5.760.201	5.353.152	2.735.800	617.721	378.661	255.963	0	0	0	0	0	0	0	0
Desaladora LP-II	103.177	175.681	0	88.503	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Desaladora LP-III.	17.220.497	17.366.896	19.209.752	21.829.069	22.366.321	23.153.138	23.882.443	25.989.619	23.818.954	22.865.629	23.006.211	23.645.851	23.645.851	23.578.826
PRODUCCIÓN TOTAL	23.083.875	22.895.729	21.945.552	22.535.293	22.744.982	23.409.101	23.882.443	25.989.619	23.818.954	22.865.629	23.006.211	23.645.851	23.645.851	23.578.826
CONSUMO PROPIO PLANTAS:														
Desaladora LP-I.	15.386	13.300	7.376	0	16.611	3.811	3.449	1.514	1.460	1.460	1.217	1.217	1.217	782
Desaladora LP-II	0	0	0	17.270	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Desaladora LP-III.	160.789	167.423	193.102	457.792	293.737	334.613	78.446	1.234	820	2.329	6.561	6.648	6.648	1.850
TOTAL CONSUMOS PROPIOS PLANTAS	176.175	180.723	200.478	475.062	310.348	338.424	81.895	2.748	2.080	3.789	7.778	7.865	7.865	2.632
COMPRA/VENTA INTERNA PLANTAS:														
Compra a UNELCO	23.307	41.055	40.396	17.480	21.416		0	0	0	0	0	0	0	0
Venta a UNELCO	68.270	31.904	397	11.703	2.230	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL COMPRA/VENTA INT. PLANTAS	-44.963	-50.849	-39.999	5.777	19.186	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Venta Agua Destilada		613	799	88	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL AGUA BOMBEADA PLANTAS	22.862.737	22.663.544	21.784.274	22.065.920	22.453.820	23.070.677	23.800.548	25.986.871	23.816.874	22.861.840	22.998.433	23.637.986	23.637.986	23.576.195
Propias.	1.672.314	1.487.476	1.767.425	1.692.016	2.007.864	1.925.170	1.798.111	1.586.643	1.856.659	1.865.596	1.647.520	1.703.180	1.703.180	1.376.347
Discontinuas.	0	100.602	81.128	100.000	377.500	147.730	10.000	0	95.000	205.200	0	0	0	0
Compras Proveedores	3.602.300	3.702.184	4.611.762	5.195.314	4.621.777	4.141.019	4.283.314	2.562.001	2.961.219	2.197.474	2.072.083	2.171.561	2.171.561	1.911.283
Compras - Ventas Internas.	-582.704	39.458	47.830	52.173	58.244	55.641	57.969	74.105	65.848	64.304	51.415	66.265	66.265	52.068
Reservas iniciales.	123.173	140.863	211.326	143.059	288.400	281.099	338.174	268.724	335.500	300.540	306.422	223.340	223.340	514.274
SUBTOTAL RECURSOS	27.676.820	28.134.127	28.503.745	29.248.482	29.807.605	29.621.336	30.288.116	30.478.344	29.131.100	27.494.954	27.075.873	27.802.332	27.802.332	27.430.167
Mermas en embalses	120.000													
Pérdida en Alta		0	0	0	294.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Reservas finales.	140.863	211.326	143.059	288.400	281.099	338.174	268.724	335.500	300.540	306.422	223.340	258.783	258.783	388.788
Saldo Cambios.	2.777	20.366	301	70.284	57.262	13.389	5.062	-58.354	-50.419	66.026	-63.674	12.632	12.632	-2.697
TOTAL M³ DISTRIBUIDOS	27.418.734	27.943.167	28.360.987	29.030.368	29.288.768	29.296.551	30.024.454	30.084.490	28.780.141	27.254.558	26.788.859	27.556.181	27.556.181	27.038.682
DISTRIBUCIÓN DIARIA	75.120	76.557	77.701	79.318	80.246	80.265	82.259	82.198	78.850	74.670	73.394	75.290	75.290	
VENTAS TARIFADAS:														
Clientes	19.420.464	19.512.536	19.916.424	20.094.046	19.853.357	19.951.159	20.044.496	20.253.118	20.136.425	20.247.174	19.696.801	19.614.548	19.614.548	19.224.793
Ayuntamiento	1.349.975	1.463.050	1.605.995	1.860.186	1.772.019	2.001.094	1.845.767	1.714.167	1.620.143	1.322.233	1.247.065	1.397.373	1.397.373	1.276.780
Autoridad Portuaria		541.613	540.929	514.258	576.274									
OTRAS VENTAS:														
Ventas Internas		802.317	873.708	751.421	658.475									
Agua destilada	1.098													
Ventas en Alta	572.859													
Ventas Internas (Zona Portuaria)						799.276	832.022	757.794	579.986	614.353	591.093	641.338	641.338	707.769
Ventas Internas (Zona Sta. Brigida)						794.630	865.430	756.226	770.018	745.752	738.139	751.320	751.320	816.272
Ventas Agua de riego en alta	21.304	12.011	10.482	17.089	5.392	3.108	5.030	7.309	5.441	4.359	4.594	10.508	10.508	7.137
Otras Ventas	0	192.000	192.000	240.000	240.000	240.000	240.000	319.266	222.000	222.000	276.000	80.384	80.384	64.867
TOTAL VENTAS	21.365.700	22.523.527	23.139.538	23.477.000	23.105.517	23.789.267	23.832.745	23.807.880	23.334.013	23.155.871	22.553.692	22.495.471	22.495.471	22.097.618
CONSUMOS PROPIOS:														
Dependencias	48.667	170.492	197.869	206.585	213.237	224.111	238.206	284.619	253.858	242.341	240.351	215.246	215.246	247.033
Empleados	41.199	41.124	41.441	41.436	39.925	39.072	38.413	38.992	39.287	39.794	38.613	38.057	38.057	36.900
Agua en propiedad	37.676	36.197	35.778	34.002	33.147	31.667	31.452	31.467	33.606	60.327	90.671	89.204	89.204	28.760
TOTAL CONSUMO PROPIO	127.542	247.813	275.088	282.023	286.309	294.850	308.071	365.078	326.751	342.462	369.635	342.507	342.507	312.693
DEVOLUCIÓN DE VENTAS	0													
Modificados y créditos	-47.211	-172.207	-114.043	-157.150	-130.619	-91.249	-16.704	-64.292	-62.017	-54.748	-33.974	-74.153	-74.153	-32.512
TOTAL M³ FACTURADOS	21.446.031	22.599.133	23.300.583	23.601.873	23.261.207	23.992.768	24.122.112	24.108.756	23.598.747	23.443.585	22.888.353	22.763.825	22.763.825	22.377.799
M³ FACTURADOS DIARIOS	58.756	61.915	63.837	64.663	63.729	65.734	66.088	65.871	64.654	64.229	62.711	62.196	62.196	61.309
M³ AJUSTES MÍNIMO	1.291.474	1.359.253	1.396.023	1.440.851	1.514.742	1.566.297	1.629.477	1.675.676	1.760.759	1.778.950	1.817.383	1.817.702	1.817.702	1.864.997
TOTAL M³ MEDIDOS	20.154.557	21.239.880	21.904.560	22.161.022	21.746.465	22.426.471	22.492.635	22.433.080	21.837.988	21.664.635	21.071.970	20.946.123	20.946.123	20.512.802
M³ CONSUMIDOS DIARIOS	**55.218**	**58.191**	**60.012**	**60.549**	**59.579**	**61.442**	**61.624**	**61.293**	**59.830**	**59.355**	**57.731**	**57.230**	**57.230**	**56.199**
AJUSTE POR ADELANTO FACTURACIÓN										-245.887				
RENDIMIENTO INTERANUAL	73,51%	76,01%	77,23%	76,34%	74,25%	76,55%	74,91%	74,57%	75,88%	78,58%	78,66%	76,01%	76,01%	75,86%

Tabla 3. Comparativa caudal base y caudal real depurado (Fuente: EMALSA. Informes mensuales de gestión. (*) Estimado.

M3*1.000/año	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004(*)	2005(*)	2006(*)	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014(*)
Caudal base del contrato	9.904	9.904	9.904	9.904	9.904	9.904	9.904	9.904	9.904	9.904	9.904	10.250	11.289	11.289	11.289	11.289	11.289
Caudal realmente depurado	7.046	6.895	7.018	7.748	7.722	8.551	9.024	9.735	10.302	10.969	10.949	10.119	11.218	11.703	13.282	13.114	15.171

Cada uno de los tres servicios, abastecimiento, saneamiento y depuración tiene su propio mecanismo de revisión de precios que exige, según los casos, acuerdos de la Junta de Gobierno, del Ayuntamiento Pleno, o de la propia Comisión de Precios de Canarias.

EL ACUERDO DE INTERVENCION. PRECEDENTES, JUSTIFICACION Y OBJETIVOS

A raíz del último informe de revisión de los precios de abastecimiento del año 2011, que fue negativo por falta de justificación, y de la propia tramitación de las facturas del contrato de saneamiento correspondiente a los últimos meses de 2012, se constituye un grupo compuesto por 6 empleados públicos municipales que elaboran un documento titulado "Adecuación de la política hidráulica municipal a un entorno de restricción presupuestaria y a un modelo de desarrollo de la relación contractual EMALSA/Ayuntamiento", conocido también como APHD y del cual toma razón el Pleno celebrado del 23 de abril de 2013 (Bolívar-Toledo et al., 2013). En él se realiza una diagnosis de la situación de la concesión y se proponen una serie de recomendaciones al Ayuntamiento en materia de Política Hidráulica.

El APHD señala una serie de debilidades del contexto administrativo de la concesión, entre las cuales se pueden destacar:

a) La incompleta conceptualización del Ciclo Integral del Agua en Las Palmas de Gran Canaria al no incluir la reutilización agrícola a escala insular dentro de la misma.

b) La introducción de dos figuras "Concesión a empresa pública" y "Gestión indirecta a través de empresa de economía mixta" simultáneamente en un solo acto administrativo.

c) La ausencia de Pliego de Cláusulas Técnicas y de definición del término de "supervisión".

Asimismo, el estado de supervisión de la concesión fue calificado en términos generales de inexistente o deficiente y por lo tanto, su diagnosis, aunque admite que no dispone de herramientas adecuadas para realizarla en profundidad, muestra elementos inquietantes, bien por problemas concretos, bien por obsolescencia de instalaciones importantes.

Por lo que se refiere a los procedimientos administrativos relacionados con los servicios concesionados, el APHD estima que "En términos generales, tales procedimientos, cuando existen, están agotados".

Finalmente, el APHD concluye con una serie de recomendaciones agrupadas en torno a 10 ejes:

1 Reorganización del Servicio de Aguas del Ayuntamiento.
2 Acceso a los datos sobre la situación actual del ciclo integral del agua.
3 Inventario de situación del stock de capital público cedido a EMALSA.
4 Mejora del control institucional de la concesión a EMALSA, de sus cuentas, resultados
5 Redefinición del concepto de "Supervisión".
6 Reformulación jurídica administrativa del contrato.
7 Obtención de la concesión para la reutilización para riego de las aguas depuradas.
8 Impulso de acuerdos generales con el Consejo Insular de Aguas.
9 Impulso de acuerdos con Santa Brígida y Autoridad Portuaria de Las Palmas.
10 Búsqueda de fuentes financieras para afrontar necesidades urgentes e inmediatas

A raíz de este informe, y de los procesos de obtención de información que desencadena, se concluye con otro (Bolívar-Toledo, 2013), centrado en valorar el estado de la supervisión que realiza el Ayuntamiento en la concesión del Ciclo Integral del Agua, siendo sus principales conclusiones:

- El modelo de supervisión del Ayuntamiento hacia EMALSA es insuficiente.
- Existen indicios de problemas severos o críticos en los servicios concesionados.
- El Ayuntamiento debe tener presencia y ser miembro activo de la toma de decisiones de la concesionaria.
- Existen problemas para tramitar la facturación del contrato de saneamiento.
- Se hace necesaria la formalización de un contrato programa para obtener fondos financieros para atender las cuantiosas necesidades en materia de inversión. Se hace necesario verificar que los derechos de los vecinos no se han visto mermados con la concesión.
- Las subcontrataciones de EMALSA no favorecen el control del Ayuntamiento en los servicios concesionados.

A partir de la valoración jurídica del informe anterior, el 17 de marzo de 2014 la Junta de Gobierno de la ciudad toma el acuerdo de intervención en los servicios concesionados del Ciclo Integral del Agua. Dicho acuerdo de intervención presenta algunas singularidades ya que no incluye "la fiscalización previa del gasto" dentro de los objetivos de la misma, y realiza un llamamiento a que se lleve a cabo "en plena sintonía con la función de colaboración de la concesionaria". En síntesis, los objetivos de la intervención corresponden a los de una supervisión extraordinaria que tiene como fin, además de incrementar el diagnóstico y la comprensión del Ciclo Integral del Agua, la actualización del marco relacional EMALSA/Ayuntamiento y la exploración de las posibilidades de alcanzar un contrato programa que permita la obtención de los fondos financieros necesarios que se deben aplicar a las crecientes demandas de inversión en los servicios de agua.

A raíz de un nuevo informe, el 16 de septiembre de 2014 se produce un nuevo acuerdo de prórroga de la intervención, puesto que en esencia:

> ***"El titular del Servicio carece de la información que le permita emitir un juicio positivo sobre la razonabilidad del precio que pagan los ciudadanos y abonados por los servicios del Ciclo Integral del Agua, que éstos se prestan conforme a los acuerdos concesionales, contractuales y la legislación vigente, y que los ingresos generados por la operadora sean aplicados de forma eficaz y eficiente para cubrir los costes de explotación de los servicios y mantener las prestaciones de las infraestructuras, descontando la legítima retribución al capital inicial de la iniciativa privada, de la que se desconoce, a día de hoy, su cuantía".***

CONTEXTO PARA LA ADAPTACION DEL MODELO DE GESTION

Todo ello está poniendo de manifiesto, que si bien hasta ahora los grandes desafíos del Ciclo Integral del Agua han quedado del lado de la inversión y del desarrollo tecnológico, hoy en día, y sin menoscabo de la importancia de estas variables, el reto principal parece desplazarse hacia la mejora del marco contractual, el control y la supervisión, y la propia gobernanza, lo cual engarza con buena parte de la discusión europea e internacional en materia de política hidráulica.

En nuestro caso, la evidencia es que el actual modelo de gestión unificada de una parte del ciclo del agua, por un periodo concesional tan amplio, sin pliego de condiciones técnicas, a través de empresa de empresa de economía mixta y sin planificación hidráulica previa, es

incapaz de responder a las necesidades y desafíos de gestión que plantea este recurso esencial.

La literatura actual sobre la cuestión, ONU y organismos dependientes, OCDE, Comisión Europea, International Water Association, enfatiza una y otra vez que el conocimiento científico sobre el agua es muy importante, pero que sólo es exitoso si existen instituciones efectivas y estructuras de gestión adecuadas. Los elementos esenciales de una buena gobernanza de las aguas urbanas han de considerar que (Katko, T.S. et al, 2013; OCDE, 2011; Rouse, M., 2013; Sessa, C., 2012).

- Debe haber un enfoque integrado de la política y el planeamiento del agua bien bajo una única responsabilidad administrativa bien con una unidad que lidere y tenga autoridad para coordinar las acciones.
- La política, la regulación y la gestión deben estar claramente separadas para centrar la experiencia y responsabilidad y para darle transparencia a todos los procesos.
- La recuperación íntegra de los costes es esencial para la sostenibilidad del servicio; sin ella la infraestructura se deteriora inexorablemente.
- Es necesario un organismo independiente que asegure el realismo a la hora de fijar los objetivos y para supervisar todo el proceso, sea la gestión pública o privada. Su función también es capital en aras de la transparencia.
- La recuperación de costes insuficiente conduce a una espiral descendente de deterioro de los servicios de agua.
- La planificación de la gestión de activos debe ser utilizada para predecir las necesidades futuras de inversión.
- Un proceso integrado de planificación y establecimiento de tarifas asegura que el coste de los objetivos está contemplado económicamente.
- La transparencia es importante, no sólo como un medio de lucha contra la corrupción, sino también para evitar el ocultamiento de información políticamente inaceptable; por ejemplo, los ingresos de agua que se utilizan para otros fines, o incidentes de calidad del agua que se ocultan al público. La transparencia y la participación pública deben ir de la mano.
- La participación pública proporciona la oportunidad para la comprensión de todo el proceso por parte del público y facilita el apoyo a las inversiones y a las políticas tarifarias.
- En el mundo desarrollado, que suele tener un buen servicio, los ciudadanos agradecen la información y la transparencia, posibilitando su comprensión y participación activa, lo que deriva casi siempre en la mejora de todo el proceso.
- Sin una estricta separación entre la política y las funciones de gestión dentro de los gobiernos locales es muy difícil conseguir un proceso eficiente.

CONCLUSIONES

A nuestros efectos buena parte de lo señalado aquí queda relacionado con el tipo de integración multinivel que se produzca en la formulación de la política hidráulica entre las principales administraciones con competencias en la materia: Ayuntamiento, Consejo Insular de Aguas, Gobierno de Canarias, especialmente Dirección General de Aguas, Consejería de Industria, Sanidad y Medioambiente y Gobierno de España.

En aras de permitir una valoración efectiva de la consecución de los objetivos, los incentivos a la gestión para un mejor desempeño en las operaciones del sector del agua deben estar vinculados al rendimiento. La herramienta que más se usa en la actualidad es el benchmarking, término originalmente utilizado para describir el método de aprendizaje de la "mejor de su clase" En nuestro caso, además, y mediante el uso de indicadores (Aquarating, 2014; Cabrera, E., 2007; ADERASA-GRTB, 2012), puede ser de gran utilidad para recuperar la pérdida de la iniciativa pública y la de los científicos y profesionales locales que induce el actual sistema de gestión, catalizando procesos como la planificación y supervisión, además de favorecer contextos de participación ciudadana y debate político en la propia Política Hidráulica que minimicen los riesgos de tomas de decisiones que, aunque amparadas en la mayoría, incluso en la unanimidad, por carecer de fundamento técnico puedan comprometer la garantía de suministro y la gestión eficiente de este recurso esencial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADERASA - GRTB Grupo Regional de Trabajo de Benchmarking (2012). *Informe Anual 2012*. Buenos Aires. 58 pp

Aquarating. Banco Interamericano de Desarrollo e International Water Association (2014)..

Cabrera, E. (2007). *Setting and Using Performance Indicators for Improving Utility Efficiency*. Institute of Water Tecnology- Universidad Politécnica de Valencia.19 power point slides

Katko, T.S.; Juuti, P.S. y Shwartz, K. (2013). *Water Services Management and Governance*. IWA Publishing. London. 196 pp

OECD (2011). *Water Governance in OECD Countries: A Multi-level Approach*. OECD Studies on Water., OECD Publishing. 241 pp

Rouse, M. (2013). *Institutional Governance and Regulation of Water Services.* IWA Publishing. London. 284 pp.

Sessa, C. (Ed.) (2012). *Sustainable Water Ecosystems Management in Europe*. IWA Publishing. London. 135 pp

REFERENCIAS ADMINISTRATIVAS

Acuerdo Pleno del Ayuntamiento de Las Palmas de Gran Canaria, 30 de Julio de 1992.

Acuerdo de la Junta de Gobierno de la Ciudad, de *Intervención en los servicios concesionados del Ciclo Integral del Agua,* 17 de marzo de 2014.

Bolívar Toledo, R.; Caballero Quintana, A.; Guedes Sánchez, E.; Jiménez Suárez, J.; Ramón Balmaseda, A.; y Ramos Trujillo, M. (2013). *Adecuación de la política hidráulica municipal a un entorno de restricción presupuestaria y a un modelo de desarrollo de la relación contractual EMALSA/Ayuntamiento. Reflexiones y recomendaciones – APHD*. Toma de razón por el Pleno del Ayuntamiento el 24 de abril de 2013.

Bolívar Toledo, R. (2013). *Situación actual del estado de supervisión de la gestión del Ciclo Integral del Agua en Las Palmas de Gran Canaria por la empresa mixta EMALSA*. Registro de Entrada en la Concejalía de Aguas del 4 de diciembre de 2013.

Prórroga del Acuerdo de Intervención por la Junta de Gobierno de la Ciudad, de 16 de septiembre de 2014.

ISBN: 978-84-938046-4-0

"ENTRE PIEDRA Y AGUA": ESTUDIO Y PROPUESTAS PARA LA VEGA DE SAN LORENZO

Antonio BUENO GARCÍA[1] y Daniel CÁRDENES MACÍAS[2]

[1] Departamento de Arte, Ciudad y Territorio, Aula de Infografía, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 35017 Las Palmas de Gran Canaria, España, antonio.bueno@ulpgc.es
[2] Departamento de Turismo, GESPLAN, 35002 Las Palmas de GC, España, dcarmac@gesplan.es

RESUMEN

El trabajo que se expone en el presente resumen aborda el estudio y aprovechamiento del agua dentro de la intercuenca hidrográfica Tenoya – Guiniguada, en el entorno de la Vega agrícola de San Lorenzo, en el municipio de Las Palmas de Gran Canaria (Islas Canarias). Debido al progresivo abandono que han sufrido las Charcas de San Lorenzo y la importancia que estas tienen en el medio donde se enmarcan, se ha desarrollado un estudio diacrónico acreditando el estado actual y realizando desde un punto de vista geográfico un informe de sostenibilidad, de uso y gestión aplicando una serie de propuestas. Con una perspectiva holística, se han recogido datos históricos, geológicos, geomorfológicos, ecológicos, climatológicos, hidrológicos (sobre la arquitectura del agua, con cálculos de capacidad de la cuenca y de pendiente) e implementándolos en un Sistema de Información Geográfica. Con los resultados obtenidos se pretende potenciar agrícola y turísticamente la zona, fomentando el uso de Las Charcas de San Lorenzo y una ruta cultural que entremezcla la singular geología del lugar con el agua y la arquitectura vinculada a ella. Apostando por la viabilidad de un proyecto que ya realizaron nuestros antepasados en el siglo XVI.

Palabras clave: *Agua, Piedra, Charcas, San Lorenzo, Cuenca hidrográfica*

ABSTRACT

The work presented in this abstract shows the study and the utilization of the water in the Tenoya – Guiniguada hydrographic inter-basin, located in the agricultural meadow of San Lorenzo, in the municipality of Las Palmas de Gran Canaria (Canary Islands). Due to the progressive abandonment that the ponds of San Lorenzo have undergone and the importance they have within the environment where they are situated, a diachronic study has been developed to confirm their current state. A sustainability, use and management report has been carried out as well, from a geographical point of view, applying a series of proposals. From a holistic perspective, the historical, geological, geomorphological, ecological, climatological and hydrological (about water architecture, with calculations of the capacity of the basin and of the slope) information has been collected and introduced in a Geographic Information System. According to the results obtained, it's expected to strengthen the area agriculturally and touristically, by promoting the use of the ponds of San Lorenzo and by setting a cultural tour up that intermingles the special geology of that place with the water and the architecture linked to it. That is, supporting the viability of a project which was already carried out by our ancestors in the 16th century.

Key words: *Water, Stone, Ponds, San Lorenzo, Hydrographic Basin.*

INTRODUCCIÓN

Cada vez son más los espacios colmados por construcciones de gran envergadura y menos las áreas libres, dedicados a la descongestión urbana y al desarrollo de la sociedad, esta generadora de un producto cultural y principalmente público.

Con este trabajo se pretende aportar una rentabilidad social a una parte de la urbe que no cuenta con los equipamientos que aquí se proponen y porque no, generar una nueva economía local basada en la difusión de un patrimonio cultural hasta hoy desconocido prácticamente por la totalidad de los habitantes de la isla de Gran Canaria.

El lema o "leitmotiv" que se presenta como título, pretende reflejar una realidad que ya en el pasado marcó un antes y un después en la tradición económica y paisajística en este entorno. "La Piedra" se ve representada en las diferentes formaciones geológicas de la cuenca hidrográfica objeto de estudio y como no, en la cantera que se asienta en el barranco del Pintor, existente desde el siglo XV. "El Agua" se vincula sobre todo a las Charcas (Figura 1) que se enmarcan en la Vega agrícola de San Lorenzo, ofreciendo un espacio para el aprovechamiento del agua para uso agrícola y contribuyendo a la nidificación de aves migratorias. Por lo tanto, la propuesta de creación de una ruta cultural justifica el título, apareciendo en el inicio como en el final de la misma, el agua y la piedra respectivamente.

Como antecedentes aparece un proyecto de "Parque Agroambiental de la Vega de San Lorenzo" que evita la pérdida de suelo agrícola, junto con la creación de un aula de la naturaleza y revitalizar el uso del agua que antiguamente se daba en la zona. El proyecto que se presenta en este trabajo pretende continuar, aportando nuevas ideas y revitalizando una zona totalmente degradada y con un gran valor paisajístico y cultural.

MARCO GEOGRÁFICO

El ámbito de estudio abarca parte de la intercuenca Tenoya –Guiniguada, desde su cabecera hasta la circunvalación de Las Palmas de Gran Canaria a su paso por Tamaraceite, localizada entre los 300 y 600 metros de altitud, en el noreste de la isla de Gran Canaria. Viene determinada por una sucesión de barrancos en V de corte oeste – este donde el barranco de San Lorenzo funciona como cuenca receptora de los mismos, con un corte sur – norte perpendicular a los cauces que desembocan en él.

La "unidad de recurso natural" (Santana, 2001) que afecta a este espacio es el Alisiocanario (Santana y Pérez Chacón, 1991), en el sector nororiental de la isla, ofreciendo a la economía agrosilvopastoril del siglo XVII temperaturas cálidas, suaves pendientes, suelos fértiles y alto potencial energético. (Máyer Suárez y Romero Martín, 2002)

GEOLÓGICO Y EDAFOLÓGICO

Se reconocen varios apartados geológicos en toda esta zona, algunos con mayor relevancia que otros. En la parte con mayor altitud, lindando con la unidad de cumbre de Gran Canaria, predomina las incursiones de lavas basálticas, brecha volcánica Roque Nublo y brecha volcánica "Block and ash", pertenecientes al ciclo Roque Nublo. Emisiones lávicas

de composiciones básicas e intermedias, erupciones de carácter explosivo que generaron potentes depósitos ignimbríticos de aspecto brechoide e intrusiones de domos de naturaleza fonolítica (Pérez Torrado y Mangas, 1992).

Figura 1. Charca de San Lorenzo, ubicada cerca de la carretera GC-300. Trabajo de Campo 2014.

Por otro lado, en la zona baja, ligado a la Vega de Agrícola de San Lorenzo, se encuentran materiales fundamentalmente sedimentarios, en los que destacan las facies detríticas de arenas y conglomerados poco clasificados y depósitos aluviales actuales (Mapa Geológico de Gran Canaria, 1999), estos últimos muy interrelacionados con las Charcas de San Lorenzo, objetivo principal del presente trabajo.

Las Charcas de San Lorenzo, son un conjunto de estanques compuestos por arcillas expansivas mediterráneas de grandes dimensiones que bordean la finca denominada "Las Casas del Pico" desde el fondo del barranco. Éstas presentan un aumento de volumen generado por los cambios de humedad, y de contracción cuando se secan, pudiéndose observar grietas de una gran profundidad.

HIDROGRÁFICO

El ámbito de estudio engloba un área total de 32,97 km^2 y una longitud total del cauce de barranco de 33,5 km, todo con una pendiente media del 22% (Plan General de Ordenación Urbana de Las Palmas de Gran Canaria, 2012).

Para la selección del Coeficiente de Escorrentía, necesitamos conocer (además del tipo de cobertura vegetal) dos parámetros específicos del área en estudio: la pendiente promedio del terreno (la cual podría bien ser la resultante del estudio morfológico de la cuenca) y el tipo de suelo predominante en el área de estudio, de forma tal de poder estimar su nivel de permeabilidad, la cual deberá ser determinada a partir de muestreos, inspección directa o estudios geológicos.

TIPOS DE SUELOS

En el ámbito de actuación, con un predominio de los vertisoles y de los luvisoles cálcicos, engloban suelos aptos para una utilización agrícola poco intensiva. Los vertisoles se encuentran estrechamente condicionados por el material que les dio origen, mientras que los luvisoles se caracterizan por la acumulación de arcilla y de materia orgánica en horizontes subsuperficiales, con una potencia entre 30 y 50 cm.

Estos tipos de suelos (Rocas, arcillas, limos arcillosos) tienen un factor de impermeabilidad bajo, con un coeficiente de escorrentía óptimo, por lo que prácticamente la totalidad de las aguas superficiales son captadas por los cauces de barranco de la cuenca hidrográfica.

ECOLÓGICO

Este conjunto de charcas constituye un ecosistema de pequeños reductos acuáticos que juegan un importante papel de nicho ecológico para diversas especies de plantas, invertebrados y aves. Según estudios recientes de la Sociedad Española de Ornitología, cuentan con más 40 especies de aves nidificantes y migratorias, siendo uno de los lugares de interés ornitológico más importantes del archipiélago.

Asociadas a las charcas existen multitud de especies faunísticas de interés, como es la rana de San Antonio (*Hyla arborea*), además de la rana común (*Peresis*). También cabe destacar especies de aves nidificantes como la alpispa o lavandera cascadeña (*Motacilla cinerea*), el chortilejo chico (*Charadrius dubius*) o la polla de agua (*Gallinula chloropus chloropus*), hoy en día no se encuentran debido al progresivo estado de abandono de este enclave natural.

Existe, por otro lado, un enclave de especial interés medioambiental asociado a los valores de biodiversidad y paisajístico conformado por un entorno de palmeral de *Phoenix canariensis* de moderada cobertura que se desarrolla en las terrazas aluviales del barranco de San Lorenzo. En los sectores de mayor pendiente, alejados de los depósitos aluviales, se desarrolla un acebuchal muy abierto. La palmera canaria y el acebuche (*Olea cerasiformis*) se hallan incluidos en el Anexo II de la Orden sobre protección de especies de la flora vascular Silvestre de Canarias.

PATRIMONIAL

Este paraje cuenta con una potente arquitectura del agua única en Canarias, con numerosos estanques de barro expansivo mediterráneo (FEDAC, 2000), canales, acequias, acueductos, cantoneras, construidos entre los siglos XVI y XVII con objeto de un mejor aprovechamiento del agua de lluvia para la abundante agricultura de la época.

En el interior del ámbito de actuación existe un conjunto urbano histórico (San Lorenzo), con un marcado carácter rural, hasta su incorporación en 1939 al municipio capitalino, pasando a formar parte del área periurbana. Este entorno edificado cuenta con multitud de elementos patrimoniales que refuerzan las propuestas planteadas más adelante. La iglesia y la plaza, construidas en el siglo XVII, figuran como elementos estructurantes de este conjunto urbano, mientras que circunscritas a estas se localizan edificaciones con gran valor arquitectónico e histórico.

Figura 2. Acequia construida en piedra, con soporte elevado al paso por el cauce del barranco de San Lorenzo. Trabajo de Campo 2014.

DIAGNÓSTICO TERRITORIAL

El paisaje ha sufrido un aumento poblacional continuo desde 1900 hasta la actualidad, debido a su cercanía a la capital, así como un retroceso de la actividad agropecuaria, medio de vida tradicional de la zona. El continuo crecimiento de la urbe obliga a que parte de la población que se concentraba en el área metropolitana, inicie su traslado hacia nuevas urbanizaciones en un continuo disperso en el medio rural colindante. Al construirse las viviendas sobre suelos potencialmente agrícolas se produce una competencia de recursos, ya que las urbanizaciones han de dotarse de equipamientos e infraestructuras, lo rural se convierte en urbano. Como consecuencia, la mayoría de las charcas se encuentran secas y abandonadas.

Se está viendo sometido a un fuerte impacto ambiental, generado por actividades ilegales, como el motocross, los quads, el vertido incontrolado de basura y escombros junto a pistas de tierra y laderas procedentes de las edificaciones colindantes, vertidos tóxicos en la cantera propios y foráneos de alquitrán, aceites y betún, la invasión con perros de caza en terrenos de zonas de nidificación y la destrucción progresiva de todo el patrimonio etnográfico de este enclave natural.

También se ha denunciado la captura ilegal de aves en las charcas de San Lorenzo, dañando a especies endémicas macaronésicas que están a punto de desaparecer en Canarias.

PROPUESTAS

Para lograr la protección y desarrollo en un entorno con un gran potencial, de gran riqueza ecológica, etnográfica, agrícola y patrimonial, se requiere una recuperación integral, de modo que se facilite el desarrollo sostenible de la misma, pudiendo excepcionalmente albergar equipamientos respetando sus valores intrínsecos.

Figura 3. Centro de interpretación diseñado.

Figura 4. Acequia transportando agua.

Relacionadas con el paisaje

Establecer una zona de transición entre lo rural y lo urbano, un pulmón para la ciudad, un parque agroambiental. Recuperar y potenciar los recursos naturales, formaciones de bosque termófilo en las laderas para evitar la erosión y sirva de sotobosque a otras especies animales y vegetales. Desarrollo de las actividades agrícolas existentes o recuperables. Retirada de basura y otros vertidos ajenos al lugar y puesta en uso de las charcas, repoblando las paredes para evitar su erosión y conseguir o fomentar el espacio idóneo para la nidificación de aves. En este apartado se prevé una temporalidad de ejecución de lo propuesto de 24 meses, tiempo estimado para la recuperación vegetal de la llanura agrícola del barranco de San Lorenzo.

Relacionadas con el patrimonio

Catalogación de los elementos de interés etnográfico para su rehabilitación y acondicionamiento, mantener los usos tradicionales y desarrollar los actuales. Recuperación de los tomaderos y redes de captación de agua (Figura 4), recuperación de los cauces públicos. Poner en valor la cantera como ruta de extracción al aire libre. El tiempo para la rehabilitación y el acondicionamiento va en función de la elaboración del catálogo patrimonial, estimado en 60 días a partir de la fecha de inicio.

Relacionadas con el deporte

Determinadas tipologías de uso público tienen un buen marco para su integración. El senderismo, el campo a través, cicloturismo y la escalada son ejemplos de las posibles actividades que se pueden desarrollar en el entorno. Para esto es necesario una acondicionamiento de un rocódromo en la zona de la Presa del Pintor puesto que aquí existe un afloramiento basáltico con potencial para este deporte y por otro lado, la adecuación de un tramo de la ruta con la rehabilitación de muros de piedra seca, prohibir el acceso de vehículos motorizados y adecuar la pavimentación, todo ello con un tiempo previsto de 6 meses.

Relacionadas con el ocio y esparcimiento

Un circuito de perimetral sobre la cuenca y una red de senderos locales tematizados que cubran las rutas de interés etnográfico, ecológico y cultural (Figura 5), así como y espacios de uso colectivo, de observación de aves migratorias, son propuestas sencillas de realizar y de muy bajo coste económico. Esta propuesta relacionada con el ocio y el esparcimiento se realizará conjuntamente con las propuestas deportivas.

Relacionadas con las actividades didácticas

Recuperación del patrimonio natural, de la flora y fauna dañadas, utilizando fechas emblemáticas y como una actividad escolar para la toma de conciencia de los mismos. Habilitar las construcciones abandonadas como puntos de información, aula de la naturaleza (Figura 3) y puntos de observación de aves migratorias, cursos de ornitología, biogeografía, etnografía, talleres de actividades tradicionales y educación sobre la cultura y ciclo del agua. Para la rehabilitación de la vivienda abandonada, su adecuación y elaboración de paneles informativos y expositivos se estiman unos 6 meses.

CONCLUSIONES Y REFERENCIAS (OTRAS PROPUESTAS: "RUTA CULTURAL")

Tras la obtención de unos resultados en la fase de análisis y el diagnóstico territorial, se concluye con la ejecución de la propuesta de un espacio libre urbano, que sirva para, principalmente, rescatar un área absolutamente degradada para un mejor aprovechamiento y gestión del agua en un entorno periurbano que sigue primando el uso eminentemente agrario. Con ello se favorecería la puesta en valor de un entorno paisajístico y arquitectónico con gran valor histórico y patrimonial, haciendo partícipe activamente a la población en su creación, con ejercicios de participación ciudadana.

Se realizaría una propuesta para la integración de toda la vega dentro del Espacio Natural Protegido de Pino Santo, junto con la proyección de la ruta cultural.

El agua y la piedra como variables significativas dentro de una zona con un alto potencial turístico y agrícola, aportan la significación a este estudio.

REFERENCIAS

Ayuntamiento de Las Palmas de Gran Canaria (2012). *Plan General de Ordenación Municipal de Las Palmas de Gran Canaria.*

Cabildo de Gran Canaria. *Carta etnográfica de la FEDAC.*

Instituto Geológico y Minero de España (1999). *Mapa geológico de Gran Canaria a escala 1:100.000*.

Romero, L.E. y Máyer, P. (2002). *Episodios de sequía en Gran Canaria en el siglo XVII: Análisis de las rogativas como método de reconstrucción climática.*

Santana, A. (2001). *Evolución del paisaje de Gran Canaria (siglos XV- XIX).* Las Palmas de Gran Canaria. Ediciones del Cabildo de Gran Canaria.

Santana, A. y Pérez-Chacón, E. (1991). *Sociedad y Medio: aproximación las formas históricas del uso del territorio en Gran Canaria.* VII Coloquio de Historia Canario-Americana. Ediciones del Cabildo de Gran Canaria.

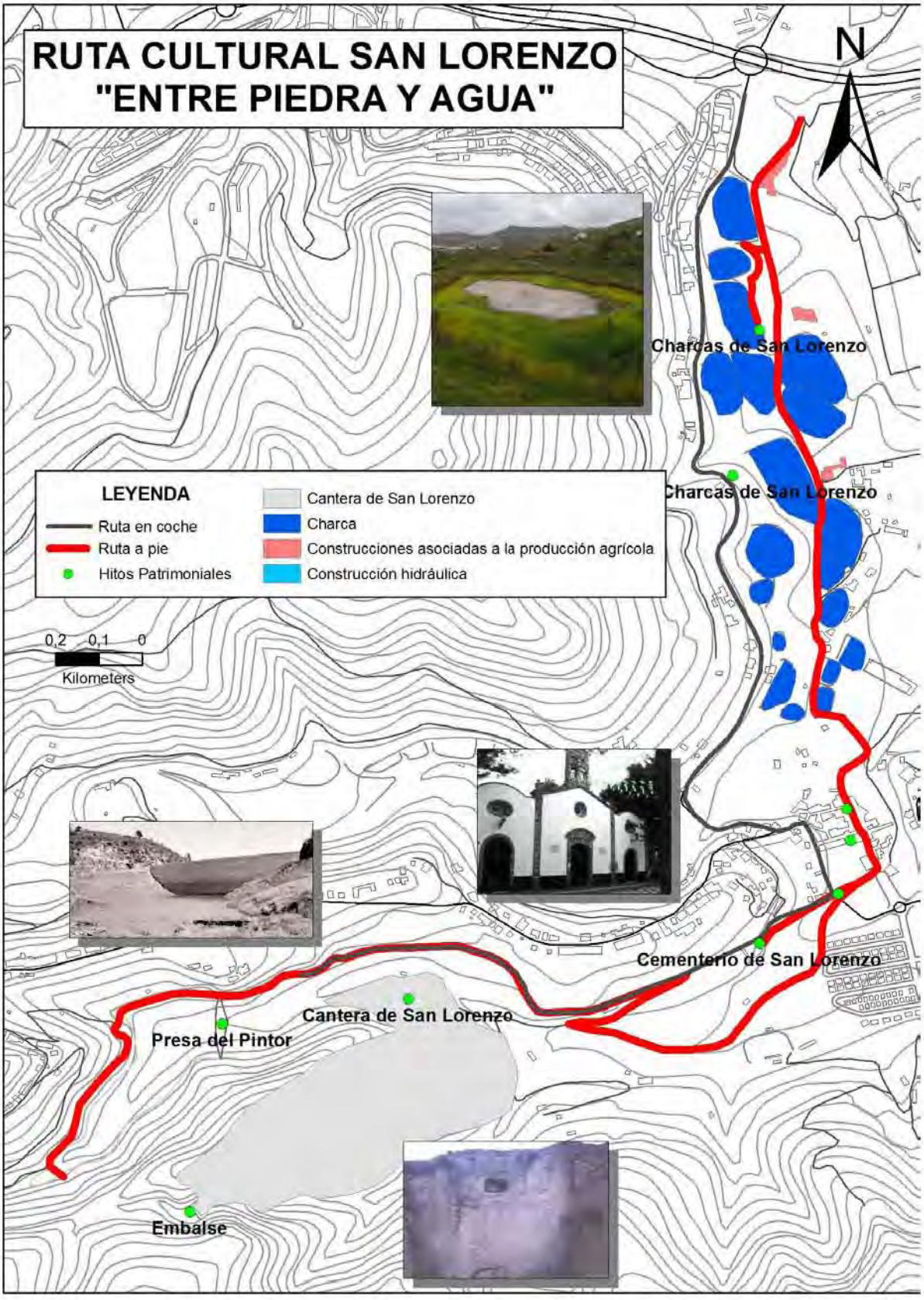


Figura 5. Propuesta de la Ruta Cultural "Entre Piedra y Agua". Elaboración propia.

ISBN: 978-84-938046-4-0

COMENTARIOS SOBRE EL PROYECTO MASE EN CANARIAS

Emilio CUSTODIO[1]

[1]Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña (UPC). c/. Jordi Girona, 1–3. 08034 Barcelona. emilio.custodio@upc.edu

RESUMEN

En el Proyecto MASE, Minería del Agua Subterránea en España, se busca analizar los aspectos hidrológicos, económicos, de gestión, sociales y éticos de la explotación intensiva de aguas subterráneas con consumo importante de reservas, cuando su recuperación requiera algunas generaciones humanas. Se desarrolla en las dos áreas más significadas españolas: el Levante español y Canarias (Gran Canaria y Tenerife). En las áreas de medianías y cumbres de Gran Canaria y Tenerife se produce una recarga media importante, que puede superar 100 mm/año. La explotación intensiva de los acuíferos mediante pozos (dominantes en Gran Canaria) y galerías (en gran proporción en Tenerife) ha producido descensos importantes de los niveles freáticos insulares que suponen un consumo de reservas que se estima en 1 a 3 km^3. Sin embargo la extracción es menor que la recarga. La diferencia es descarga al mar, más importante en Tenerife debido a sus formaciones volcánicas más recientes. Tras un hipotético cese de las extracciones la recuperación se puede producir en pocas décadas, pero como en Tenerife la captación se ha hecho preferentemente con galerías, el volumen vaciado no es recuperable y por tanto se ha producido una real minería del agua subterránea.

Palabras clave: *Minería del agua subterránea, Gran Canaria, Tenerife*

ABSTRACT

The objective of the MASE Project, Groundwater Mining in Spain is the analysis of the hydrological, economic, managerial, social and ethical aspects of groundwater intensive use with significant use of reserves when the recovery will need some human generations. It is developed in the two more significant Spanish areas: the South–east of Spain and the Canary Islands (Gran Canaria and Tenerife Islands). In Gran Canaria and Tenerife the areas at mid and high altitude may exceed 100 mm/year of recharge. The intensive aquifer development by means of wells (which dominate in Gran Canaria) and water galleries (which dominate in Tenerife) has produced a reserve depletion estimated between 1 and 3 km^3, two thirds of them corresponding to Tenerife Island. However, abstraction is less than recharge. The difference is outflow into the sea, which is more important in Tenerife due to its younger volcanic formations. After a hypothetic closing down of groundwater abstraction the recovery to a position close to natural can be attained in a few decades, but since groundwater is obtained in the mid and high elevations of Tenerife by galleries, the reserve depleted cannot be recovered and thus a true groundwater mining has been produced.

Key words: *Groundwater mining, Gran Canaria, Tenerife*

EL PROYECTO MASE: OBJETIVOS, PLANTEAMIENTO Y REALIZACIÓN

El objetivo principal del Proyecto MASE (Minería del Agua Subterránea en España) es preparar un informe en que se recopilen y analicen los aspectos económicos, ambientales, sociales, éticos y administrativos del consumo sostenido de reservas de agua subterránea –minería del agua subterránea– en España, con el apoyo de un adecuado conocimiento hidrológico–hidrogeológico, tanto en cantidad como en calidad, considerando la evolución, el estado actual y la prospectiva. Este objetivo se concreta en el Levante Español y en Canarias, como los lugares más significados. En lo que sigue se tratan los aspectos relativos las islas de Gran Canaria y Tenerife. No se consideran otros aspectos relacionados, como los de salinización y contaminación, que no son objeto del proyecto MASE. Aunque el motivo central está en relación con el consumo continuado de reservas de agua subterránea, por lo menos como iniciador del proceso de desarrollo social, la minería del agua subterránea se considera en el contexto integral de los recursos de agua, teniendo en cuenta las implicaciones ambientales, energéticas y territoriales.

La tarea en curso ha sido la de reunir y analizar el conocimiento y experiencia que ya existe. Se ha procedido a estudiar la información escrita de la que se ha dispuesto y a recabar la experiencia de un conjunto de expertos e instituciones seleccionadas. No se han hecho ni estudios específicos ni análisis detallados, lo que puede dar lugar a sesgos, contradicciones y deformaciones, cuya corrección sería objeto de actividades posteriores.

Esta tarea cuenta con el apoyo económico de AQUALOGY, bajo la supervisión de CETaqua, y se realiza en el Departamento de Ingeniería del Terreno de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Barcelona, con aportaciones en el caso de Canarias de diversos expertos locales, tanto de la Administración del agua actual como pasada, de la parte empresarial y de las Universidades de Las Palmas de Gran Canaria y La Laguna.

En el proyecto MASE no se pretende encontrar respuestas definitivas ni proponer acciones concretas ya que ello no es posible sin realizar trabajos complementarios según la gran diversidad de situaciones, las habituales restricciones e ineficiencias legales y administrativas, el comportamiento social de cada lugar y el gran individualismo asociado a la explotación de las aguas subterráneas.

CONSIDERACIONES BÁSICAS

Toda extracción de agua subterránea supone un descenso de niveles piezométricos para que el agua fluya hacia la captación. Este descenso supone una reducción del agua almacenada, de forma que al principio el agua extraída procede de ese almacenamiento; posteriormente se produce un aporte creciente procedente de la recarga, el cual deja de estar disponible en las descargas que se producían previamente (Custodio, 2011; Konikow y Leake, 2014). Cuando la extracción que se realiza es menor que la recarga, las descargas se reducen progresivamente hasta que se alcance un nuevo equilibrio si las otras condiciones se mantienen estables. Estos descensos dinámicos son inevitables y responden al comportamiento hidráulico natural. Cuando la extracción que se realiza es mayor que la recarga no se llega a un nuevo equilibrio y se consumen reservas de agua continuadamente, hasta su agotamiento práctico o hasta que la extracción no puede continuar por razones físicas, de calidad o económicas. Esta situación es la de interés para el proyecto MASE.

Cabe definir varios conceptos relativos a la explotación del agua subterránea (Collin y Margat 1993; Custodio 2002; 2010; Custodio et al. 2008; Foster y Loucks, 2011; Hernández–Mora et al. 2001). Los *recursos renovables* coinciden aproximadamente con la *recarga* al sistema acuífero o a parte del mismo e incluyen el agua que se puede intercambiar con los

acuitardos y otros acuíferos del propio sistema acuífero o con otros sistemas y pueden variar con el estado de explotación del acuífero. Los *recursos explotables* son los que pueden ser extraídos con afecciones asumibles, en función de otras captaciones de agua subterránea, de las descargas naturales y de la naturaleza; no es un valor determinado, sino un conjunto de valores en función de lo que se considere asumible o de lo que se quiera conservar, y por lo tanto no es una decisión técnica sino social y política.

La *minería del agua subterránea* o *consumo continuado de reservas de agua subterránea* es una situación de explotación intensiva en la que a largo plazo la extracción supera a la recarga y por lo tanto hay un consumo mantenido de reservas de agua subterránea y un descenso continuado de niveles piezométricos, que es lo que desde hace décadas se viene observando en Gran Canaria y Tenerife. La evolución inicial en una situación de minería del agua es similar a la de la explotación intensiva con extracción que no supere a la recarga, lo que deja una incertidumbre difícil de analizar y el hacerlo puede carecer de valor práctico en las primeras etapas de explotación. La diferencia se manifiesta en etapas más avanzadas y siempre y cuando se disponga de observaciones suficientes en el espacio y en el tiempo y además los datos se interpreten correctamente. Cuando la extracción supera claramente a la recarga, pero con una recarga aún significativa, si cesase la explotación se podría producir una lenta recuperación de la reserva consumida. Se podría considerar que hay minería del agua cuando el tiempo de recuperación tras el cese de las extracciones sea de por lo menos dos generaciones humanas, o sea más de 50 años. La minería del agua subterránea también admite una interpretación bajo el punto de vista de la salinidad del agua. En este caso se trataría de un consumo continuado de agua dulce de forma que se substituye por aguas salinas continentales o marinas antiguas o recientes (intrusión marina), lo que es importante en el ámbito insular costero.

LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN CANARIAS

La acumulación de materiales volcánicos y los que se derivan de los mismos, que son la totalidad de los existentes en Canarias, dan origen a conjuntos geológicamente complejos. Aunque se puede hablar de acuíferos insulares únicos, en detalle se pueden identificar unidades con características propias, unas conductoras del agua y otras almacén.

La superficie del terreno en Canarias es en general permeable, lo que facilita la infiltración de la precipitación y favorece que ésta se convierta en recarga. Cada isla tiene condiciones hidrogeológicas distintas y hay notables variaciones dentro de una misma isla, en función de los rasgos que modulan la precipitación y su distribución. La relación entre los valores medios anuales de la recarga y la precipitación son muy variables. En las áreas áridas costeras puede ser de menos del 2%, o sea menos de 2 mm/año, aunque no nula a causa de las características de la parte superior del terreno que permiten cierta recarga, si bien el agua recargada puede ser algo salobre (Custodio, 1990; 1993). En medianías y cumbres el valor puede ser del orden del 25% al 35% e incluso hasta el 50%, o sea entre 100 y 250 mm/año, hasta más de 400 mm/año (Cabrera el al., 2013; Naranjo et al., 2014).

La capacidad de transmisión y el almacenamiento temporal de la recarga en el medio subterráneo es variable, pero en general se hace con escasas manifestaciones permanentes del agua subterránea en superficie. En estado natural el agua recargada fluía de cumbre a mar, con descarga difusa periférica a lo largo de la costa, y también con algunas importantes descargas en nacientes y en fondos de barranco en islas altas de núcleo, como es el caso de Gran Canaria, si bien ya no fluyen desde mediados del siglo XX debido a la intensa explotación del agua subterránea. Las diferentes circunstancias hidrogeológicas de Tenerife favorecen la descarga de agua subterránea lo largo de la costa, lo que no es tan acusado en Gran Canaria.

La explotación del agua subterránea mediante muy numerosos pozos y galerías es intensiva. Esto ha producido importantes efectos, que son primariamente descensos freáticos, (de hasta varios metros anuales en zonas de medianías) y de cumbres), con valores acumulados de hasta más de 300 m y una progresiva disminución de los caudales captados y de los nacientes, muchos de los cuales se han secado (Hernández–Quesada et al., 2011a). Es un proceso hidrodinámico inevitable, aun cuando la explotación sea menor que la recarga. La evolución transitoria tras una perturbación singular puede durar décadas. De ese modo, una parte notable del agua que se extrae en medianías y cumbres son reservas de agua subterránea, ya que la descarga al mar se ve afectada sólo moderadamente, en especial en Tenerife. El descenso de niveles piezométricos suele ir acompañado de una reducción de permeabilidad y a veces de aguas cada vez de peor calidad. La necesidad de extender progresivamente la penetración de las galerías y la profundidad de los pozos de medianías y cumbre para mantener los caudales es una característica de la explotación de las aguas subterráneas en Gran Canaria y Tenerife, que configura su aprovechamiento y la economía, sociedad e instituciones relacionadas. Para captar una parte significativa de las actuales descargas difusas al mar los descensos en el interior insular deberían ser mucho mayores, lo que es inviable. En las áreas costeras el problema principal es la salinización. Lo que se podía hacer en buena manera ya se ha hecho y se ha sobrepasado, lo que es una forma de minería del agua dulce subterránea.

Con anterioridad a 1970 ya se había desarrollado una buena parte de las infraestructuras de captación de agua subterránea, en especial en Gran Canaria y Tenerife, con las especificidades necesarias para afrontar la escasez (Custodio y Cabrera, 2002; 2013). Buena parte del conocimiento científico y técnico actual parte del Estudio Científico de los Recursos de Agua en Canarias, con las siglas SPA–69–515 (SPA–15, 1975), realizado entre 1969 y 1975 por UNECO y un equipo español vinculado al Servicio Geológico de Obras Públicas, del MOP. Al mismo tiempo se realizaron inventarios de recursos de agua y captaciones financiados por el Gobierno español, principalmente en Tenerife y Gran Canaria. En trabajos posteriores, como el proyecto MAC–21 (década de 1980, no publicado) y otros inventarios para la Planificación Hidrológica, se han ampliado y actualizado esos inventarios. Estos han sido los puntos de partida para el conocimiento hidrogeológico que permite analizar la explotación intensiva y en su caso la minería del agua subterránea (Custodio, 2011; Jiménez Suárez, 2013). Buena parte de los avances derivados los han liderado distintos departamentos universitarios, en general en coordinación (Cabrera y Custodio, 2011). Salvo excepciones (como el Consejo Insular de Aguas de Tenerife) la aportación posterior al conocimiento y a la información por parte de la administración del agua ha sido de moderada a pequeña, y están en recesión.

Buena parte de las aguas subterráneas extraídas en Canarias se dedican a usos agrícolas de regadío dadas las buenas condiciones existentes, y ese uso es el que ha permitido el progreso económico y social desde finales del siglo XIX, aunque actualmente el paradigma es diferente y se basa en turismo, servicios y una agricultura muy intensiva y seleccionada. La superficie regada en Canarias es de casi 25000 ha a las que se aplican 210 hm^3/a de agua subterránea, de los que retornan al acuífero casi 30 hm^3/a según se dice en los planes hidrológicos, o sea un consumo de algo más de 180 hm^3/a.

La situación de explotación intensiva y de la minería de las aguas subterráneas a lo largo del siglo XX es diferente que la que se tiene durante el presente siglo XXI a causa del aporte significativo de recursos de agua marina desalinizada y de forma menos acusada de aguas usadas regeneradas, la que además es diferente en Gran Canaria que en Tenerife. Los aspectos de calidad tienen cada vez mayor relevancia y eso abre una nueva dimensión a la explotación del agua subterránea (Custodio, 2013) en cuanto a la salinidad, composición iónica y en especial en Tenerife el exceso de flúor.

La evaluación del consumo de reservas presenta dificultades por la indefinición de las superficies freáticas insulares y no disponerse de valores confiables de la porosidad drenable en el entorno de ese nivel freático. En Tenerife se puede obtener de la modelización matemática actualizada, pero tampoco las cifras son precisas a causa de las incertidumbres del resto de parámetros. Una primera estimación grosera apunta a 1 a 3 km^3 totales, de los que del orden de 2/3 corresponderían a Tenerife. Se trata de descensos dinámicos de lenta evolución, aunque localmente la tasa de descenso puede llegar a 10 m/año, pero parece más un efecto local que regional. Con la buena recarga existente en las áreas de medianías y la moderada en cumbres, la recuperación de niveles tras un hipotético cese de extracciones se podría producir en dos a cinco décadas en buena parte de Gran Canaria y Tenerife, con lo que una parte del consumo de reservas podría tomarse como minería del agua subterránea. Se ha producido verdadera minería del agua en las medianías y cumbres de Tenerife, mucho menos en Gran Canaria, a causa del drenaje permanente que producen las galerías. No es posible técnica ni económicamente obstruir o establecer cierres en las galerías, aunque se ha hecho en algunas. La salinización que se ha producido en algunas áreas costeras es de lenta recuperación. No ha sido aún valorada.

ASPECTOS SOCIO–ECONÓMICOS DE LA MINERIA DEL AGUA SUBTERRÁNEA Y SU CONCRECIÓN EN CANARIAS

La minería del agua subterránea en principio no es sustentable a largo plazo, si bien ese largo plazo puede ser muy dilatado en grandes sistemas acuíferos. Esto es una consideración importante de cara su viabilidad y aceptabilidad económica, social y ética. La sustentabilidad de la explotación del agua subterránea de un cierto acuífero es un concepto complejo y cambiante en el tiempo que hace referencia a la cantidad de agua disponible, la calidad del agua aportada y el estado del medio ambiente, bajo considerandos económicos, sociales, administrativo–legales y éticos, además de los hidrológicos y que se enmarca en la del conjunto integrado de recursos hídricos y su evolución, y esto a su vez en el marco de la sustentabilidad de las actividades humanas en relación con el uso del agua o de las que se crean por estar el agua disponible.

La no sustentabilidad intrínseca de la minería del agua y en especial debido a que los costes sociales asociados son impopulares, pueden crear reacciones mediáticas contrarias y dan origen a normativas para tratar de impedir que se produzca. Esto puede ser acertado en unos casos, pero en otros puede suponer una pérdida de oportunidades de desarrollo económico y social sustentable cuando la minería del agua subterránea se hace de forma racional. Esa racionalidad puede ser fruto de un planteamiento inicial o más comúnmente ser una consecuencia que se deriva de la toma de conciencia de la evolución que se observa, con adopción de medidas correctoras, que es en esencia la situación en Canarias. En este último caso existe una etapa inicial de deterioro, más o menos dilatada, que es necesaria bajo un punto de vista realista y un tanto cínico, pero se puede acortar y atenuar con un adecuado conocimiento, suficientes observaciones y buena gobernanza. En Gran Canaria y Tenerife se inició la etapa de corrección en la década de 1990, pero no se ha realizado de forma sostenida y sistemática, a causa no sólo de la actual crisis económica sino por pérdida de capacidad técnica, observación insuficiente, un exceso de intervención política y falta de visión a largo plazo. La función impulsora que en general ha tenido la aplicación de la Directiva Marco del Agua europea no ha sido suficiente.

La minería del agua subterránea –como en otros tipos de minería– puede producir beneficios netos que permiten el desarrollo de las sociedades humanas, de modo que con la capitalización social de esos beneficios es posible evolucionar hacia otros modos de aprovisionamiento hídrico que hagan sustentable la disponibilidad de agua y proporcionen seguridad hídrica, dentro de la a su vez indefinición de sustentabilidad social en un contexto

continuamente cambiante. Se trata de algo aún poco analizado en detalle y que merece tratarse con mayor profundidad, en particular en Canarias, en especial frente a una aplicación estricta de la Directiva Marco del Agua europea que no tenga en cuenta la posibilidad de negociación de excepciones que permitan que se pueda producir minería del agua subterránea bajo determinadas circunstancias, en función de un beneficio razonable y justificado dentro de un contexto de planificación espacial y temporal amplio. Todos estos conceptos son básicos para las instituciones públicas y privadas, para la gobernanza del agua y para que lo que se hace sea ético y moralmente correcto.

En estos aspectos, la situación en Canarias es particular en el contexto mundial debido a sus instituciones (Heredades y Comunidades de Aguas, mercados del agua) y la minería del agua subterránea debe enfocarse según las mismas. El agua ha sido el motor del desarrollo económico en el pasado aunque en la actualidad ya no lo sea con el mismo protagonismo, aún es importante y posiblemente lo continuará siendo. No obstante, no hay valoraciones basadas en análisis socio–económicos de si ese desarrollo basado en el consumo de reservas, aunque sea dinámicas en buena manera, con un coste creciente Hoyos–Limón y Puga, 2007), tiene un saldo positivo o negativo en un contexto temporal amplio. Ha habido notables interferencias entre los explotadores de aguas subterráneas, con una notable litigiosidad que llevó que tan pronto como en 1924, dentro de una Ley de Aguas en que las aguas subterráneas eran del dominio privado, se estableciese un régimen espacial para Canarias. También ha habido interferencias con el medio ambiente dependiente de las aguas subterráneas, pero actualmente se tiene poca memoria de lo sucedido y los servicios de la naturaleza perdidos ya tienen poco valor, de modo es posible que su recuperación pueda suponer costes sociales mayores que los beneficios que se obtendrían, por lo menos a nivel general.

La existencia de un importante y generalizado comercio del agua, tanto en Gran Canaria como en Tenerife (Puga et al., 1997; Hoyos–Limón, 2004), aunque con cierta decadencia, es una de las singularidades canarias, que ha jugado un papel importante en la explotación intensiva del agua subterránea. Esto ha permitido la inversión de una cantidad importante de recursos económicos privados, con amplia participación de la población. Probablemente lo seguiría haciendo de no existir las actuales limitaciones administrativas y la oferta de agua de producción pública a precios púbicos (tarifas) que se deciden fuera del mercado y que pueden incluir subvenciones importantes, explícitas o encubiertas, además de una disminución de la demanda para regadío, que es una parte muy significativa del total. Esta es una de las causas de la reducción de extracciones de agua subterránea, junto con el aumento de costes, en especial debido a precio creciente de la energía para elevar el agua. Esta situación explica la disminución de la tasa de descenso de niveles del agua e incluso su frenado y aún recuperación en lugares del Norte de Gran Canaria. Sin embargo, la pérdida de interés en inversiones de captación de agua, si bien es favorable para reducir el consumo de reservas, puede crear problemas futuros si no llegan recursos económicos públicos que los reemplacen. Las reservas existentes son aún importantes, pero costosas y con cierto riesgo de pérdida de calidad en determinados lugares. Así, el cese del consumo de reservas no es una opción beneficiosa clara, no bien analizada. Sin embargo, la recuperación de niveles del agua tras un periodo de restricciones puede favorecer volver a una cierta explotación, menos que la actual, pero más económica. Esto tampoco está valorado.

CONCLUSION

En Gran Canaria y Tenerife se ha producido y sigue produciéndose un consumo continuado de reservas dinámicas de agua subterránea, valorable entre 1 y 3 km^3 en total, a una tasa actual de unos 50 hm^3/año, que va decreciendo, de los que son real minería del agua la parte drenada irreversiblemente por las galerías de Tenerife, y con aún notables

salidas de agua dulce al mar, en especial en Tenerife, que no parecen técnicamente recuperables. Este consumo de reservas ha permitido el desarrollo económico social insular y aún continúa jugando un papel dominante, pero no hay una clara prospectiva ante nuevas situaciones de oferta de agua, de retracción de las inversiones privadas y de un papel de la administración cambiante según las directrices políticas y que asume ofertar agua con subvenciones, en parte encubiertas. Falta observación, conocimiento actualizado, que los usuarios se involucren más en la observación y gestión, una administración más tecnificada y actuaciones más seguras y con visión a largo plazo, al tiempo que se evoluciona hacia un necesario y posiblemente inevitable cambio de paradigma.

AGRADECIMIENTOS

Se agradecen las correcciones y sugerencias de un revisor anónimo.

REFERENCIAS

Cabrera, M.C. y Custodio, E. (2011). *La investigación hidrogeológica en Canarias desde el proyecto Canarias SPA–15.* En: M.C. Cabrera, J. Jiménez y E. Custodio (eds.). El conocimiento de los Recursos Hídricos en Canarias: Cuatro Décadas después del Proyecto SPA–15. AIH-GE. Las Palmas de Gran Canaria: 109–116.

Cabrera, M.C.; Naranjo, G.; Cruz–Fuentes, T.; Hernández–Quesada, P.; Benavides, A.; Estévez, E.; Martín, L.F. y Custodio, E. (2013). *Aplicación del balance de cloruros para la estimación de la recarga natural al acuífero del norte de Gran Canaria.* X Simposio de Hidrogeología. Granada. Hidrogeología y Recursos Hidráulicos. Asociación Española de Hidrogeólogos. Madrid, XXX: 499–508.

Collin, J.J. y Margat, J. (1993). *Overexploitation of water resources: overreaction or an economic reality?* Hydroplus, 36: 26–37.

Custodio, E. (1990). *Saline groundwater in the Canary Islands (Spain) resulting from aridity*. En: Greenhouse Effect, Sea Level and Drought. NATO ASI Series C: Mathematical and Physical Sciences 325. Kluwer, Dordrecht: 593–618.

Custodio, E. (1993). *Coastal aquifer salinization as a consequence of aridity: the case of Amurga phonolotic massif, Gran Canaria Island*. En: Study and Modelling of Salt Water Intrusion. CIMNE–UPC. Barcelona: 81–98.

Custodio, E. (2002). *Aquifer overexploitation, what does it mean?* Hydrogeology Journal, 10(2): 254–277.

Custodio, E. (2010). *Intensive groundwater development: A water cycle transformation, a social revolution, a management challenge.* In: L. Martínez–Cortina, A. Garrido, E. López–Gunn (eds.) Rethinking Water and Food Security. Botín Foundation/CRC Press: 259–298.

Custodio, E. (2011). *Evolución del conocimiento hidrogeológico e hidrológico en Canarias*. En: M.C. Cabrera, J. Jiménez y E. Custodio (eds.), El conocimiento de los Recursos Hídricos en Canarias: Cuatro Décadas después del Proyecto SPA–15. Asociación Internacional de Hidrogeólogos–Grupo Español. Las Palmas de Gran Canaria.

Custodio, E. (2013). *Trends in groundwater pollution: loss of groundwater quality & related services.* Groundwater Governance: A global Framework for Country Action. Global Environmental Facility-United Nations, 10 3726: 1–76.

Custodio, E. y Cabrera, M.C. (2002). *¿Cómo convivir con la escasez de agua?. El caso de Canarias.* Boletín Geológico y Minero, Madrid, 113 (3): 243–258.

Custodio, E. y Cabrera, M.C. (2013). *The Canary Islands*. In: L. De Stefano and M.R. Llamas (eds.). Water, Agriculture and the Environment in Spain, Can We Square the Circle ? CRC-Fundación Botín/Observatorio del Agua: 281–290.

Foster, S. y Loucks, D.P. (eds.) (2011). *Non–renewable groundwater resources: a guide book on socially–sustainable management for water–policy makers.* IHP–VI Series in Groundwater 10, UNESCO/IAH/GW–State Word Bank: 1–103.

Hernández–Mora,N.; Llamas, M.R. y Martínez–Cortina, L. (2001). *Misconceptions in aquifer overexploitation: Implications for water policy in Southwestern Europe.* In C. Dosi (ed.), Agricultural Use of Groundwater, Towards Integration between Agricultural Policy and Water Resources Management. Kluwer Academic Press: 107–125.

Hernández–Quesada, P.; Cabrera, M.C. y Custodio, E. (2011a). *Características y evolución de los nacientes en las cuencas de los barrancos de Azuaje y Moya, norte de Gran Canaria.* En: M.C. Cabrera, J. Jiménez y E. Custodio (eds.). El Conocimiento de los Recursos Hídricos en Canarias: Cuatro Décadas después del Proyecto SPA–15. AIH-GE. Las Palmas de Gran Canaria: 73–79.

Hernández–Quesada, P.; Cabrera, M.C. y Custodio, E. (2011b). *Ensayo de balance hídrico de las cuencas de los barrancos de Moya y Azuaje (Norte de Gran Canaria): estimación de recarga mediante balance de la deposición atmosférica de cloruros.* En: L.J. Lambán, T. Carceller, M. Valverde y C. Fernández–Jáuregui (eds.), Las Aguas Subterráneas: Desafíos de la Gestión para el Siglo XXI. Congreso Ibérico de Aguas Subterráneas. Zaragoza. AIH-GE. Tema 3, 7 pp.

Jiménez Suárez, J. (2013). *El estudio científico de los recursos de agua en las Islas Canarias*. 100 Años de Hidrogeología en España (1900–2000). IGME. Madrid: 458–469.

Hoyos–Limón, A., Puga, L.O. (2007). *Los costes en alta del agua de Tenerife*. Documentos para el Plan Hidrológico de Tenerife. Santa Cruz de Tenerife: 1–61.

Hoyos–Limón, A. (2004). *Tres comunidades de agua de Tenerife*. Plan Hidrológico de Tenerife. Consejo Insular de Aguas de Tenerife. Santa Cruz de Tenerife: 1–29 (interno).

Konikow, L.F. y Leake, S.A. (2014). *Depletion and capture: Revisiting "the source of water derived from Wells".* Ground Water, 52. doi:10.1111/gwat.12204.

Naranjo, G.; Cruz–Fuentes, T.; Cabrera, M.C.; Martín, L.F. y Custodio, E. (2014). *Avances en la estimación de la recarga natural mediante la aplicación del método del balance de cloruros atmosféricos al acuífero del norte de Gran Canaria.* II Congreso Ibérico de las Aguas Subterráneas, Valencia. AIH-GE: p 18.

Puga, M.; Puga, E. y Puga L. (1987). *Distribución de la propiedad de las "acciones" de agua en Comunidades de Agua de la Isla de Tenerife: presentación de datos*. Las Aguas Subterráneas en La Planificación Hidrológica en las Islas Canarias. AIH–GE: 219–224.

SPA–15 (1975). *Estudio científico de los recursos de agua en las Islas Canarias* (SPA/69/515). Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Obras Hidráulicas. UNESCO. Las Palmas de Gran Canaria, Madrid. 3 vol. + mapas.

ISBN: 978-84-938046-4-0

LA EXPLOTACIÓN DEL ACUÍFERO DE LA ALDEA (GRAN CANARIA) DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA DIRECTIVA MARCO DEL AGUA

Tatiana CRUZ-FUENTES[1], María del Carmen CABRERA[1], Javier HEREDIA[2] y Emilio CUSTODIO[3]

[1] Departamento de Física (GEOVOL), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC). Las Palmas de Gran Canaria, España, tcruz@proyinves.ulpgc.es; mcarmen.cabrera@ulpgc.es
[2] Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Madrid. España. j.heredia@igme.es
[3] Dpto. de Ingeniería del Terreno y Cartográfica. Universidad Politécnica de Cataluña (UPC). Barcelona. España. emilio.custodio@upc.edu

RESUMEN

El valle de La Aldea, al oeste de Gran Canaria, se dedica a la agricultura intensiva en un clima semi-árido. El agua de riego proviene de aguas superficiales y subterráneas. El acuífero está aislado del resto de la isla por el borde impermeable de la Caldera de Tejeda. El aluvial principal de La Aldea se comporta como un depósito de almacenamiento de agua que se llena y vacía, con un tiempo medio de renovación de aproximadamente 2 años. Las aguas subterráneas muestran una alta salinidad de origen natural, debido a la evapo-concentración de la deposición atmosférica y la interacción agua-roca, y antropogénica debida a los retornos de riego que producen contenidos en nitratos que pueden alcanzar los 700 mg/L. Se ha establecido un modelo conceptual de funcionamiento del acuífero y se han cuantificado los términos del balance de agua. El uso actual del acuífero está en conflicto con los requerimientos de la Directiva Marco del Agua (DMA). Sin embargo, dado que su uso es clave para el desarrollo económico del valle de La Aldea en particular, cabe plantear las excepciones legales específicas previstas en la DMA.

Palabras clave: *Acuífero volcánico-sedimentario, explotación intensiva, retornos de riego, Directiva Marco del Agua (DMA), Gran Canaria.*

ABSTRACT

La Aldea Valley, in the west side of Gran Canaria, is dedicated to intensive agriculture in a semi-arid climate. Irrigation water comes from reservoir water and groundwater. The aquifer is isolated from the rest of the island by the impermeable boundary of the Tejeda Caldera. The main alluvial deposits act as a water storage tank which is filled and emptied with an average turnover time of approximately two years. Groundwater show high natural salinity due to evapo-concentration of atmospheric deposition and water-rock interaction and anthropogenic due to irrigation return flows that produce nitrate contents which can reach 700 mg/L. A conceptual model of the aquifer has been defined and the groundwater budget has been quantified. The current use of the aquifer may be in conflict with the requirements of the Water Framework Directive (WFD). However, since their use is crucial to the economic development of La Aldea Valley, specific legal exceptions under the WFD should be raised.

Key words: *volcano-sedimentary aquifer, intensive exploitation, irrigation return flows, Water Framework Directive (WFD), Gran Canaria.*

INTRODUCCIÓN

La Directiva 2000/60/CE (D.O.C.E., 2000) establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas que tiene como objetivo alcanzar el buen estado de las aguas en 2015, prevenir el deterioro en cuanto a la cantidad y la calidad de las masas de agua subterránea, mejorar el estado de todos los ecosistemas acuáticos y promover el uso sostenible del agua. Estos objetivos deben alcanzarse mediante la adopción de medidas correctoras, en caso de que sean necesarias, que se deben efectuar después de llevar a cabo la evaluación del estado de las masas de agua, o bien declarando algunas masas como excepciones, cuando esté justificado.

En este trabajo se presentan algunas consideraciones acerca del estado cuantitativo y cualitativo que condicionan la implantación de la DMA en el acuífero de La Aldea (Fig. 1). El sistema acuífero volcánico-sedimentario de La Aldea constituye una de las 10 masas de agua subterránea definidas para la isla y es un ejemplo de un acuífero intensamente explotado en una región semi-árida con agricultura intensiva. La escasez de agua local debido al clima se suple mediante el uso de aguas alóctonas procedentes de tres embalses situados aguas arriba del Barranco de La Aldea. Por ello, el acuífero se convierte en una pieza clave del sistema hídrico para regular las fluctuaciones de disponibilidad de agua y garantizar la disponibilidad de agua para el riego en épocas de sequía.

Los primeros estudios hidrogeológicos datan de la década de 1970, dentro del proyecto SPA-15 (MOP-UNESCO, 1975) para toda la isla de Gran Canaria. Desde 1992 se han llevado a cabo proyectos más específicos en la zona para caracterizar el sistema acuífero (Bejarano et al., 2003; Cabrera et al., 2006; Muñoz, 2005), culminando con el establecimiento de un modelo conceptual de funcionamiento del acuífero y el posterior desarrollo, calibración y validación de un modelo numérico de flujo y de transporte del agua subterránea (Cruz-Fuentes, 2008; Cruz-Fuentes et al., 2014a y b).

EL MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

Con una superficie de 44 km^2, el valle de La Aldea (Fig. 1) presenta un fondo plano rodeado de fuertes escarpes al norte, sur y este, con alturas que alcanzan de 1415 m snm, y se abre al mar al oeste. El valle está dividido por el barranco principal de La Aldea, en dirección este-oeste, donde desembocan los barrancos secundarios de Tocodomán y Furel y una serie de pequeños barrancos tributarios de menor entidad. La zona tiene un clima subtropical seco caracterizado por la alternancia de periodos secos y húmedos, con una notable variabilidad de las lluvias estacionales y anuales. La precipitación media (1980-2005) es de aproximadamente 160 mm/año, superando 250 mm/año en años húmedos y por debajo de 100 mm/año en los años secos.

La isla ha sido conceptualizada hidrogeológicamente como un cuerpo de agua único, aunque heterogéneo, en el que la recarga tiene lugar en la cumbre y la circulación se produce hacia la costa (MOP-UNESCO, 1975; Custodio, 2007). Sin embargo, el acuífero de La Aldea queda fuera del sistema general de funcionamiento debido a la existencia de materiales de baja permeabilidad que rellenan la Caldera de Tejeda y limitan la zona por el este. Por lo tanto, el acuífero de La Aldea se comporta como un sistema hidrogeológico aislado, sin aportes laterales significativos y en contacto con el resto de la isla únicamente a través de un estrecho cañón de depósitos aluviales (Cruz-Fuentes et al., 2014a).

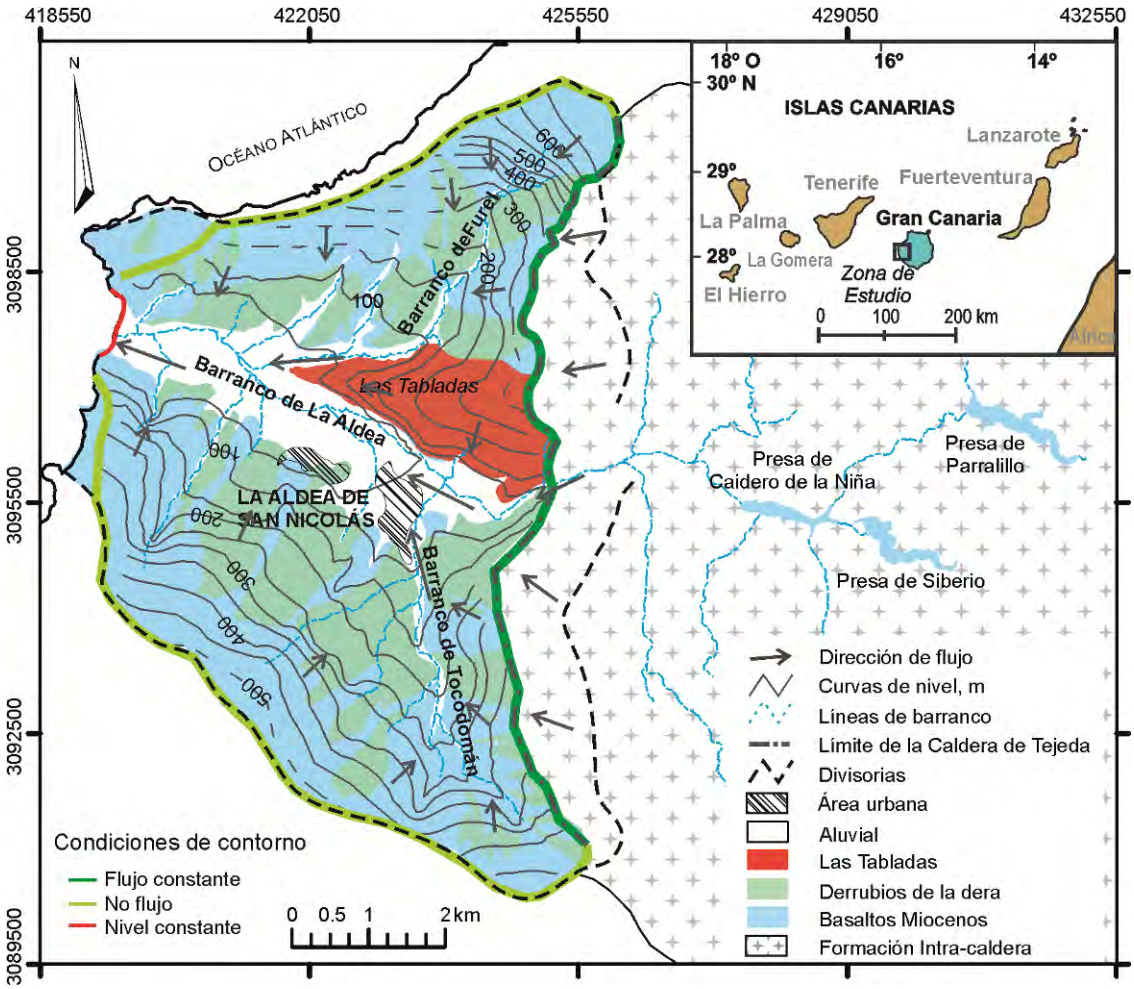


Figura 1. Mapa de localización del valle de La Aldea y distribución espacial de los principales dominios hidrogeológicos. Se muestra la piezometría obtenida a partir del modelo numérico en condiciones estacionarias para el año hidrológico 1991/92, coincidente en gran medida con la piezometría real. También se muestran las condiciones de contorno para el modelo de flujo.

La geología de la zona (Fig.1) permite dividir el acuífero en dos unidades: una unidad sedimentaria superior y una unidad volcánica inferior, que han sido consideradas como unidades hidrogeológicas. La unidad volcánica está formada por los Basaltos Miocenos que ocupan toda la superficie de la zona de estudio pero que afloran únicamente en las partes altas del valle. La unidad sedimentaría está constituida por los depósitos aluviales de fondo de barranco y los derrubios de ladera que se localizan en los flancos de las montañas. Por último, la zona de Las Tabladas, situada entre los barrancos de La Aldea y Furel, constituye un relieve residual con una estructura compleja, donde afloran materiales volcánicos y sedimentarios más recientes (Muñoz, 2005; Cruz-Fuentes, 2008). Aunque los depósitos sedimentarios, con conductividades hidráulicas entre 5 y 100 m/d, son más permeables que los basaltos (conductividades hidráulicas entre 0.0009 y 0.005 m/d), ambos constituyen un único acuífero libre dividido en dos sub-capas conectadas hidráulicamente (Muñoz, 2005; Cruz-Fuentes et al., 2014a) como muestra la superficie piezométrica resultante para el año hidrológico 1991/92 (Fig. 1). El agua subterránea en los diferentes materiales (basaltos, derrubios de ladera y Las Tabladas) fluye hacia los depósitos aluviales y hacia el aluvial principal del barranco de La Aldea. En el valle existen más de 370 pozos de gran diámetro, poco profundos (entre 2,5 y 3 m), situados principalmente en la parte central del acuífero, con un régimen de extracción variable.

Las entradas de agua al sistema proceden de la infiltración de lluvia y los retornos de riego. Las salidas se producen por las extracciones y al mar a través de una pequeña sección litoral. El agua extraída, principalmente en el aluvial principal, es una mezcla de todas las unidades hidrogeológicas y muestra características hidrogeoquímicas consistentes con esta mezcla (Muñoz, 2005; Cruz-Fuentes, 2008; Cruz-Fuentes et al., 2014b). La mayoría de las muestras de agua subterránea son Cl-Na, aunque también se observan muestras HCO_3-Na, SO_4-Na, Cl-Mg y Cl-Ca (Fig. 2). En general, existe concordancia entre la dirección del flujo de las aguas subterráneas y el aumento del contenido de cloruro, salvo para las muestras de los pozos cercanos a la zona de Las Tabladas, donde se observa un aumento significativo de la salinidad.

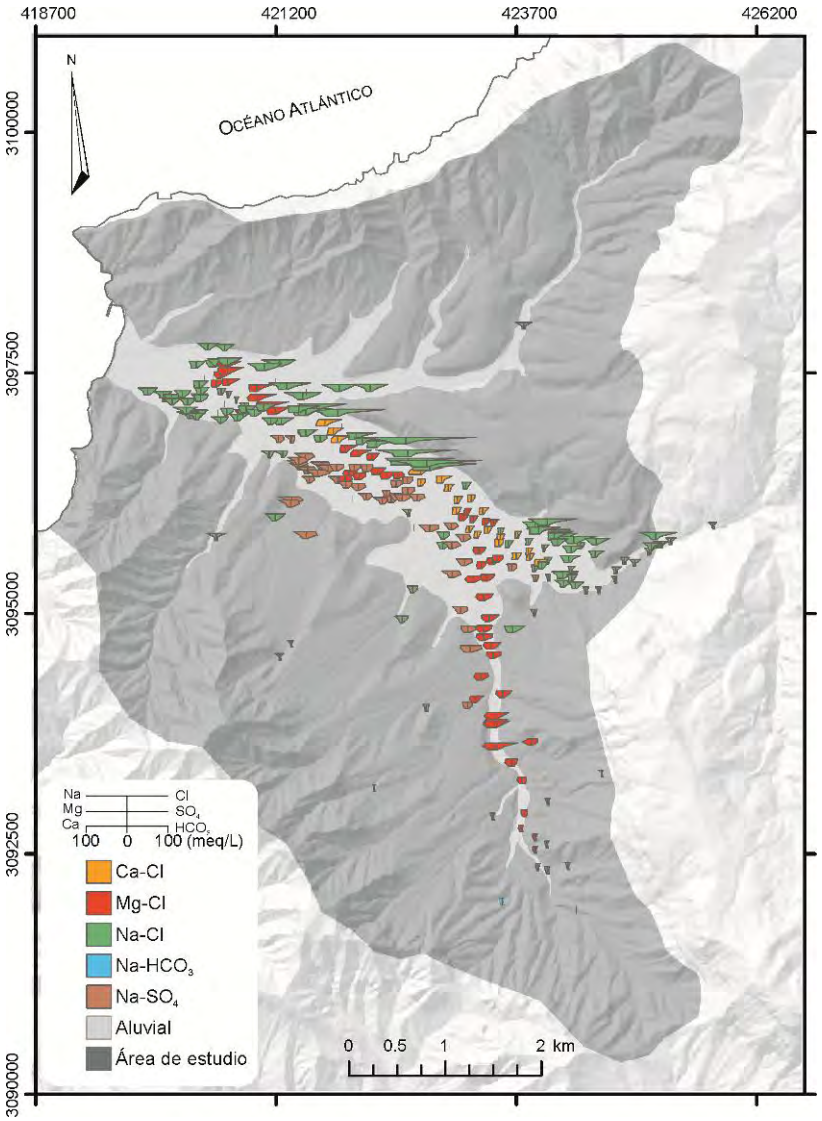


Figura 2. Familias de aguas subterráneas representadas mediante diagramas Stiff modificados, según el muestreo llevado a cabo en 1999 (Cruz-Fuentes et al. 2014b).

ESTADO CUANTITATIVO

El principal uso del agua en la zona es la agricultura, con un patrón altamente estacional relacionado con los distintos periodos de cultivo del tomate. Las necesidades de riego son cubiertas por los tres embalses localizadas fuera de la zona, que cubren el 70% durante los años húmedos, mientras que el agua subterránea proporciona el 30% restante. Sin

embargo, en años secos las presas sólo proporcionan el 30%, por lo que el 70% restante tiene que ser complementado por una extracción de agua subterránea intensiva. Por ello, el acuífero de La Aldea es clave para el suministro de agua, principalmente en periodos de sequía.

Durante el período seco 1997-1999 fueron instaladas en la zona dos plantas de desalinización de agua de mar y varias pequeñas plantas de desalinización de aguas subterráneas salobres para diluir la alta salinidad del agua subterránea utilizada para el riego, cuando el agua de los embalses no estuvo disponible. En este periodo se incrementó el uso de almacenamiento del acuífero, agotando las reservas de agua subterránea. Los niveles descendieron aproximadamente 3 m en el aluvial principal y más de 10 m en los derrubios de ladera y los basaltos Miocenos, indicando que los depósitos aluviales reciben agua del almacenamiento de los basaltos Miocenos y en los derrubios de ladera. Estos últimos, junto con los aluviales tributarios de menor entidad, tienen un papel significativo en el sistema de flujo, funcionando como "drenes" --caminos preferentes de flujo-- que recogen el agua de la lluvia y los retornos de riego y lo aportan al aluvial principal de La Aldea. Esta tendencia de descenso de los niveles se invirtió en los siguientes años húmedos, siendo los niveles de las aguas subterráneas para el año hidrológico 2005-2006 similares o superiores a las registradas en el año hidrológico 1991-1992 (Cruz-Fuentes et al., 2014a).

A partir de los resultados de los modelos numéricos, se ha calculado que el tiempo medio de renovación del acuífero está entre 2 y 2.5 años, lo que indica que el acuífero se comporta como un depósito de agua que se vacía y se llena según la pluviometría y las necesidades de riego.

ESTADO CUALITATIVO

Los resultados de dos campañas realizadas en 1992 y 1999 (Muñoz, 2005) mostraron que las aguas subterráneas tienen una salinidad muy variable, como refleja la conductividad eléctrica, que varía entre 1075 y 13330 µS/cm. En la Figura 3 se muestra la distribución espacial de Cl y NO_3 en 1992, que representa un año húmedo, y 1999, que representa un año seco. Las concentraciones más bajas de cloruros se encuentran en las zonas altas mientras que los valores más elevados están a los pies de Las Tabladas. Comparando ambos años, se observa un aumento de la concentración de cloruros, con medias que pasan de 710 mg/L a 1110 mg/L. La concentración media de nitratos aumenta significativamente entre 1992 y 1999, alcanzando valores máximos de 485 mg/L para 1992 y 710 mg/L en 1999. En 1999, alrededor del 85% de las muestras de agua subterránea tenían concentraciones de nitratos superiores al límite europeo para el agua potable, establecido en 50 mg/L. Los mayores valores se encontraban en 1992 en la desembocadura del barranco de Tocodomán y el sur del barranco principal de la Aldea, mientras que en 1999 la mayor parte del aluvial principal presentaba valores altos de nitratos (Fig. 3).

La salinización del acuífero tiene un origen natural debido a 1) la concentración por gran evapo-concentración de la deposición del aerosol marino, típica de climas áridos y semiáridos, 2) a la interacción agua-roca y 3) a causas antropogénicas en relación con la infiltración de los retornos de riego que son de salobres a salinos. La influencia de aerosol marino aporta principalmente Cl y Na, aunque también Mg y SO_4. La meteorización es responsable del aumento de la concentración de Na y K (procedente de fonolitas) y Ca y Mg (procedente de basaltos Miocenos). Los retornos de riego aumentan el contenido de SO_4 y NO_3. En los pozos cercanos a Las Tabladas se observa una franja de alta salinidad (Fig. 3), con características parecidas al agua de mar diluida; se alcanzan concentraciones de 7500 mg/L de Cl, 3700 mg/L de Na y 1800 mg/L de SO_4, y variables en NO_3. El factor de concentración es 3 en las zonas altas periféricas, y alcanza 20 en la zona de Las Tabladas

debido a la alta capacidad de retención de agua al ser suelo más arcilloso (Cruz-Fuentes et al. 2014b). La alta salinidad de las aguas subterráneas y el exceso de contenido de nitrato degradan la calidad medioambiental de las aguas subterráneas, además de incurrir en costes para los usuarios debido a una disminución del rendimiento de los cultivos y la necesidad de reducir la salinidad del agua de riego a través de un tratamiento por ósmosis inversa.

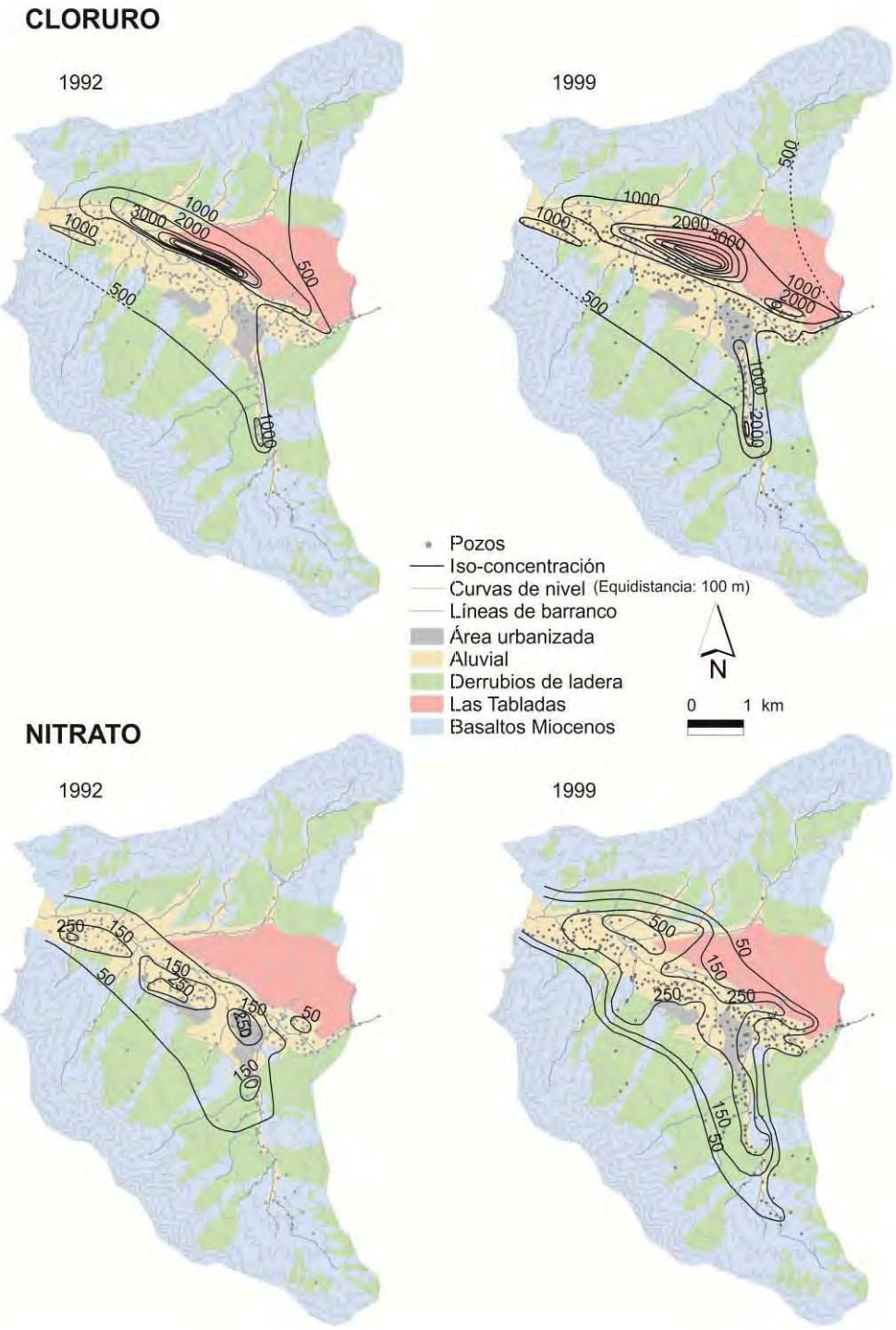


Figura 3. Distribución espacial de las concentraciones de cloruro y nitrato para los años 1992 y 1999.

CONCLUSIONES

Los trabajos desarrollados en el acuífero de La Aldea en los últimos años han permitido establecer un modelo conceptual de funcionamiento del mismo y el desarrollo de modelos numéricos ha permitido cuantificar los términos del balance hídrico de la zona. La explotación intensiva del acuífero, especialmente en épocas de sequía, y la elevada salinidad del agua subterránea procedente de la evapo-concentración en un clima árido/semi-árido y los elevados contenidos de nitratos por retornos de riego constituyen los principales impactos identificados en las aguas subterráneas de la zona de estudio. Sin embargo, para caracterizar adecuadamente el comportamiento del acuífero a largo plazo se necesitan varios años de estudio, más de los que aquí se han podido considerar.

En la zona no existe planificación para una gestión integrada de recursos hídricos, de forma que, cuando el periodo de sequía dura más de 2 años, el abastecimiento para el riego se lleva a cabo con aguas subterráneas, con efectos adversos en los aspectos cuantitativos (descenso de niveles) y cualitativos (incremento de la salinidad y de los contenidos en nitrato). La estacionalidad de la lluvia y la variabilidad intra-anual de la precipitación y las extracciones para riego guían actualmente el uso del acuífero a corto plazo, ya que las decisiones se toman de forma independiente por un gran número de usuarios del mismo.

El uso actual de las aguas subterráneas está en conflicto con los requisitos para el buen estado cuantitativo y cualitativo exigido por los principios de la DMA y las normas que se derivan de su tranposición a la Ley de aguas de Canarias. Aplicar estrictamente la DMA para reestablecer condiciones naturales y evitar la sobreexplotación, principalmente en periodos de sequía, podría suponer perdidas de infraestructuras y costes desproporcionados debido a las características especiales del acuífero de La Aldea dentro del acuífero insular y su importancia para los recursos hídricos locales. A pesar de que la eficiencia de la aplicación de fertilizantes en los cultivos podría disminuir la extensa e intensa contaminación debida su uso, la consecución de los objetivos medioambientales en cuanto a la cantidad y la calidad no es compatible con la economía local, pues implica un alto coste. Para poder continuar con este uso del acuífero se requieren consideraciones especiales a través de las excepciones legales específicas previstas en el artículo 4 de la DMA. La razón es que este acuífero es una parte clave de la capacidad de regulación del sistema de recursos hídricos y su impacto terrestre y sobre los recursos marinos litorales parece de pequeño a insignificante.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha llevado a cabo mediante un acuerdo de cooperación entre el Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria y la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, y a través de los proyectos del Ministerio de Ciencia e Innovación: CICYT 1FD97-0525, CONSOLIDER-TRAGUA (CSD2006-00044) y REDESAC (CGL2009-12910-C03-02).

REFERENCIAS

Bejarano, C., Cabrera, M.C., Candela, L., y de Paz, J.M. (2003). *Elaboración de un mapa de lixiviación de nitratos mediante una metodología de acople SIG-modelo de simulación*. Aplicación al acuífero de La Aldea (Gran Canaria). Boletín Geológico y Minero de España 114(2):213-224.

Cabrera, M.C., Pérez-Torrado, F.J., Antón, A., y Muñoz, J. (2006). *Volcanología de los azulejos y su relación con las aguas subterráneas del Valle de La Aldea (Gran Canaria).* Cabildo de Gran Canaria, Las Palmas de Gran Canaria.

Cruz-Fuentes, T. (2008). *Contribución de la modelación numérica e hidroquímica al conocimiento del acuífero de La Aldea (Gran Canaria).* Tesis doctoral. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Las Palmas de Gran Canaria.

Cruz-Fuentes, T., Cabrera, M.C., Heredia, J., Custodio, E. (2014b). *Groundwater salinity and hydrochemical processes in the volcano-sedimentary aquifer of La Aldea, Gran Canaria, Canary Islands, Spain.* Science of the Total Environment. 484:154–166. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.041

Cruz-Fuentes, T., Heredia, J., Cabrera, M.C., y Custodio, E. (2014a). *Behaviour of a small sedimentary volcanic aquifer receiving irrigation return flows: La Aldea, Gran Canaria, Canary Islands (Spain).* Hydrogeology Journal, 22:865-882. DOI 10.1007/s10040-013-1094-9

Custodio, E. (2007). *Groundwater in volcanic hard rocks.* Groundwater in fractured rocks. Taylor & Francis, Londres. 9:95-108.

D.O.C.E. (2000). *Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2000 por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.* D.O.C.E. L 327 de 22.12.00. 69 pp.

Harbaugh, A.W. (2005). *MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey modular ground-water model - the Ground-Water Flow Process*. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16. Reston, VA.

MOP-UNESCO (1975). *Estudio científico de los recursos de agua en las Islas Canarias (SPA/69/515).* Centro de Estudios Hidrográficos-Servicio Geológico de Obras Públicas. Las Palmas de Gran Canaria-Madrid.

Muñoz, J. (2005). *Funcionamiento hidrogeológico del acuífero de La Aldea (Gran Canaria).* Tesis doctoral. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Las Palmas de Gran Canaria.

ISBN: 978-84-938046-4-0

COMENTARIOS SOBRE LA INCERTIDUMBRE EN EL CONOCIMIENTO Y GOBERNANZA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN CANARIAS

Emilio CUSTODIO[1], María del Carmen CABRERA[2], Roberto PONCELA[3] y Luis Olavo PUGA DE MIGUEL[4]

[1] Departamento de Ingeniería del Terreno, Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)
emilio.custodio@upc.edu
[2] Departamento de Física, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC)
mcarmen.cabrera@ulpgc.es
[3] Profesional libre Eurogeólogo - Hidrogeólogo. Santa Cruz de Tenerife
rponcela_geo@yahoo.es
[4] Ex profesor asociado de la Universidad de La Laguna (ULL)
lpugmig@gmail.com

RESUMEN

La gobernanza del agua, y en particular del agua subterránea, requiere reglas de relación entre la administración del agua, los usuarios y la sociedad, aceptadas por los implicados y acordes con la legislación vigente. Estas reglas se fundamentan en el suficiente conocimiento de las aguas subterráneas, el cual tiene asociado una incertidumbre que puede ser importante. Esto se traduce en que en distintos estudios se obtengan diferentes evaluaciones de las aguas subterráneas. Por ello, hay que gestionar y gobernar con incertidumbre, lo que requiere reglas flexibles dentro de unos condicionantes que eviten arbitrariedades, abusos, indefensión y conflictividad. Para reducir la incertidumbre se requieren estudios, observaciones, controles, elaboración continuada de los datos y transparencia y honestidad en la información, a un nivel cuyo coste esté justificado por los beneficios que produce la explotación del agua subterránea y por la pérdida de servicios de la naturaleza. Los costes se han de cubrir por los usuarios con los beneficios obtenidos. Se requiere la mejor involucración posible del conjunto de actores en relación con el agua subterránea a través de sus instituciones y representantes, pero sin que la administración eluda su ineludible responsabilidad final.

Palabras clave: *Incertidumbre, aguas subterráneas, gobernanza, Canarias.*

ABSTRACT

Water governance, and particularly that of groundwater, requires rules to guide the relation between the water administration and the users and the society, accepted by those involved in it and in agreement with the legislation in force. These rules are based in a sufficient knowledge of groundwater, which has an uncertainty associated that may be important. This means that different studies may show different hydrogeological evaluations. Therefore, management and governance have to be done under uncertainty, which needs flexible rules but with conditions to avoid arbitrary behaviour, abuse, lack of security and conflicts. To reduce uncertainty, studies, monitoring, controls, continuous elaboration of data

and transparency and honesty are required, whose cost should be proportionate to the benefits derived from groundwater development and the loss of nature services. The costs should be paid by the water users with the benefits obtained, For this, the possible best involvement of groundwater stakeholders through their institutions and representatives is needed, but the public water administration must accept its necessary final responsibility.

Key words: *Uncertainty, groundwater, governance, Canary Islands.*

INTRODUCCIÓN

Los procesos naturales y el comportamiento de la naturaleza son esencialmente inciertos a causa de un componente estocástico que está siempre presente a cualquier escala espacial o temporal. Esta incertidumbre, a la que se puede designar como esencial o irreductible, se une a la que es debida a deficiencias, desvíos y sesgos en el conocimiento y a la que se deriva del uso de modelos conceptuales no adecuados o erróneos, observaciones imprecisas o equivocadas, insuficiente o excesivamente simplificada consideración de los procesos que se producen, inventarios y conjuntos de datos incompletos, descripciones desafortunadas o imprecisas y no pocas veces la intención de engañar al esconder realidades o inventarse datos. Estos últimos tipos de incertidumbre son reducibles con mayor esfuerzo y cuidado, pero con un coste de tiempo, esfuerzo humano y gasto económico que puede llegar a ser excesivo en el contexto de lo que se pretende gestionar en cada caso, si no se hace de forma proporcionada a la situación real. Esto viene expresado por el dicho popular de que lo mejor es enemigo de lo bueno.

Todo lo expresado anteriormente es válido en el campo de la hidrología a pesar de que con frecuencia los datos y resultados se presentan como valoraciones numéricas con muchas cifras, que en realidad carecen de valor real, siendo sólo significativas las dos o tres primeras. Esto es cierto tanto en hidrometeorología, como en hidrología de superficie, como en hidrología subterránea, en cada caso con sus matices, pero siempre con notable incertidumbre asociada, como es lo normal en evaluaciones de la naturaleza. En las dos primeras ciencias pesa más la variabilidad temporal y en la última las propiedades del terreno. Lo dicho es extensivo a las derivaciones medioambientales, económicas y sociales, que son tanto o más importantes para el usuario y la sociedad.

La incertidumbre se puede medir a partir de las desviaciones que se producen en torno a un valor más frecuente. Para distribuciones de datos con distribución estadística próxima a la normal (gaussiana), la incertidumbre se puede expresar mediante la desviación estándar (σ) y darla como $m \pm \sigma$, en la que m es la media, que comprende el 68,3% de las realizaciones posibles ($m \pm 2\sigma$ comprende el 95,4%). También se puede expresar adimensionalmente como m/σ, que es el coeficiente de variación (CV), en valor absoluto o como porcentaje. Para otras distribuciones no normales y no transformables a la misma, cabe medir la incertidumbre por el valor del intervalo entre dos cuartiles simétricos, como el 20% y el 80% y referirlos a la mediana como valor central. Cuando los valores no forman series con varios términos o no son cuantificables, la incertidumbre es una apreciación, pero en lo posible debe cualificarse para atribuirle un valor numérico aproximado.

La incertidumbre de un cierto resultado se puede obtener a partir de la raíz cuadrada de su varianza estadística y, en el caso de variables de distribución normal, esta varianza es la suma ponderada de las variancias de las diferentes variables que intervienen, siguiendo la regla de la propagación de errores. Estas varianzas y los factores de ponderación pueden ser fáciles de obtener en el caso de formulaciones cerradas, pero se requiere un análisis de sensibilidad en casos más complejos e incluso estimaciones por expertos.

En lo que sigue sólo se hacen comentarios conceptuales, principalmente referidos a las islas de Gran Canaria y Tenerife. Las valoraciones requieren estudios de detalle, que hasta el momento no se han realizado. Estos estudios son difíciles y costosos, además de discutibles ya que no es fácil un enfoque imparcial y bien ponderado. Lo que se comenta aquí se basa en parte en resultados del Proyecto MASE (véanse los agradecimientos), en la experiencia de muchos años de práctica de la hidrología subterránea y de la gestión de los recursos de agua y de la interpretación no cuantificada de situaciones reales.

INCERTIDUMBRE DEL CONOCIMIENTO Y VALORACIÓN DE LOS RECURSOS DE AGUA SUBTERRÁNEA

Las situaciones conducentes a incertidumbre en el conocimiento y gestión y por lo tanto en la gobernanza del agua subterránea son muy numerosas y difíciles de analizar de forma breve. Algunos aspectos destacan por ser los que contribuyen a la incertidumbre en mayor medida, con un peso de difícil reducción y con una parte importante que es irreducible. Por brevedad sólo se tratarán los componentes que hacen referencia a la evaluación de la cantidad de los recursos de agua subterránea, sin entrar en los relacionados con la salinidad y calidad, que son más complejos, pero no menos importantes. Los recursos de agua subterránea se evalúan por lo general a partir de un balance de agua en un acuífero o sistema acuífero, en el que hay cuatro componentes principales: recarga, descarga, variación del almacenamiento e intercambios con otras unidades del terreno, todo ello dentro de la difícil definición de los límites y condiciones del acuífero. Los límites hidrológicos más razonables, que suelen ser inciertos, pueden diferir mucho de las delimitaciones administrativas, lo que sucede en Canarias, que es el sujeto de esta comunicación, cuando se pasa del acuífero insular a partes del mismo que tienen significación específica en cuanto a sus condiciones, uso y evolución.

La recarga es una de las magnitudes más difíciles de evaluar ya que a la variabilidad temporal y espacial de la precipitación y de las condiciones atmosféricas se une la gran variabilidad del terreno y de la cobertura vegetal. Esto es especialmente cierto en Canarias, por los notables cambios altitudinales y accidentado relieve en extensas áreas y los muy notables cambios geológicos. Para obtener precisión se requiere un gran detalle territorial, pero éste no va acompañado por una suficiente densidad de información hidrometeorológica, aun cuando ésta es buena en comparación con otros lugares de España. En Canarias, la recarga procede esencialmente de la infiltración de la lluvia, con poca influencia nival y de la infiltración de agua superficial, aunque estas se producen local y esporádicamente. La generación de escorrentía de tormenta puede tener cierta importancia, en especial en diversas áreas de Gran Canaria, así como la recarga por retornos de riego en las áreas agrícolas periféricas. La evaluación de la recarga es un importante reto científico y técnico, que lleva asociada una notable incertidumbre en todos sus aspectos.

La cuantificación de la recarga se puede abordar mediante un variado elenco de métodos, que no son equivalentes ya que los valores obtenidos dependen de la escala espacial y temporal de trabajo. Los cálculos entrañan suposiciones, a veces arriesgadas, sobre los procesos y estimar los parámetros físicos locales y agregados, que es tanto más incierto cuanto más difiera el terreno de un medio granular homogéneo, lo que es común en Canarias. Por lo tanto, resultados son intrínsecamente inciertos. Los métodos de evaluación y cálculo de la recarga se presentan en distintas publicaciones generales (Scanlon et al., 2002; Lerner et al., 1990; de Vries y Simmers, 2002; Custodio y Llamas, 1976, Sec. 6; Custodio et al., 1997).

El método más utilizado para la evaluación de la recarga difusa por la lluvia es el balance de agua en el suelo a partir de datos diarios de la precipitación. Hay disponibles diversos

códigos de cálculo. En Canarias se ha usado ocasionalmente el Código BALAN (Samper et al., 2005) y en Tenerife se ha realizado balances en una detallada malla insular siguiendo un procedimiento similar al utilizado por el Centro de Estudios Hidrográficos para la Península Ibérica. Los resultados de la evaluación, aun en áreas relativamente homogéneas, tienen poco valor y pueden ser muy desviados si no se pueden calibrar los parámetros con observaciones del agua subterránea. Esta calibración, y luego validación si se dispone de un largo periodo de datos apropiados, se puede hacer mediante una simulación simplificada de los niveles freáticos o de la descarga de nacientes, modificando los parámetros en un rango razonable, para que reproduzcan aceptablemente las observaciones reales (Samper, 1998), en el supuesto de que no haya modificación importante del estado del acuífero a lo largo del tiempo. Esto es una seria limitación en Canarias ya que no hay registros continuos largos y frecuentes de niveles freáticos y estos suelen ser muy profundos, con lo que la respuesta a la recarga se retrasa y se amortigua mucho, además de que hay una importante perturbación por la explotación. En cuanto a los nacientes, la mayoría no tienen aforos ni se conocen bien sus condiciones hidrogeológicas, aparte de estar fuertemente alterados e incluso agotados por la explotación del agua subterránea. Eso hace que las evaluaciones sean altamente inciertas, independientemente del detalle territorial con que se hayan hecho. Para estimar la incertidumbre asociada hay que recurrir a análisis de sensibilidad, pero están poco sistematizados, son tediosos y rara vez se hacen. En Canarias no se han hecho hasta el momento, aunque hay unos primeros intentos para el Norte de Gran Canaria.

Otro método para la estimación de la recarga media multianual, independiente del de balance de agua, es el balance de la deposición atmosférica de cloruro en el suelo. Es un método a gran escala que agrega las condiciones del territorio para obtener valores promedio de la recarga a largo plazo, pero requiere una situación estacionaria, sin cambios en los usos del territorio ni climático (Custodio, 2009). La información necesaria no siempre está disponible en Canarias y su obtención lleva tiempo. Sin embargo, en el norte de Gran Canaria se ha avanzado notablemente, con resultados razonables (Cabrera et al., 2013), y con evaluación de la incertidumbre (Naranjo et al., 2014), los que se comparan bien con los resultados obtenidos en la Península Ibérica (Alcalá y Custodio, 2014). Se ha aplicado en el Sur de Cataluña (Espinosa, 2014), en el mismo contexto y como apoyo mutuo.

Los métodos de balance de agua en el suelo y de la deposición atmosférica de ión cloruro necesitan el soporte de un buen modelo conceptual de funcionamiento del acuífero, que combine métodos geológico–hidrogeológicos, hidrodinámicos, hidrogeoquímicos e isotópicos ambientales, a lo que muchas veces no se le ha dedicado suficiente atención, aumentado así la incertidumbre. Esto se ha tratado de resolver en diversos lugares de Canarias dentro de actividades universitarias, pero aún queda una gran labor pendiente.

La recarga por retornos de riego, importante en muchas áreas periféricas de Gran Canaria y Tenerife, se reduce a estimaciones groseras y a estudios de detalle. Tampoco se conoce bien la escorrentía superficial, que es de cierta importancia en Gran Canaria y que se podría conocer mejor de estar bien instrumentadas las numerosas presas de embalse y tomaderos existentes. Estos factores pueden tener un peso importante y aún dominante en los balances de agua de diversas áreas (Cruz-Fuentes et al, 2014a; 2014b) y contribuyen significativamente a incrementar la incertidumbre.

También la descarga de los acuíferos es notablemente incierta, por no estar bien identificada, por errores en la medida o estimación de los caudales naturales o artificiales de descarga y/o por la imposibilidad de evaluarla cuando la descarga se hace a un gran cuerpo de agua (el mar en el caso de Canarias) o como transferencia subterránea a otros acuíferos. Los inventarios de captaciones de agua subterránea en Gran Canaria y Tenerife son bastante buenos en comparación con otras áreas españolas pero aun así no son precisos en cuanto a los caudales captados ni a su temporalidad y a veces son de difícil

desagregación territorial.

Para cerrar el balance hace falta conocer las variaciones del volumen de agua almacenado en el acuífero, lo que implica disponer de un número suficiente y adecuado de puntos de control piezométrico que representen la variación del nivel freático, además de una buena geometría de los acuíferos. En Gran Canaria y Tenerife se produce un continuado consumo de reservas dinámicas de agua subterránea, de modo que su variación es un término importante del balance de agua. Su cálculo requiere conocer aceptablemente bien el valor de la porosidad drenable en la franja de variación de niveles, lo que es difícil para las formaciones volcánicas canarias y que además es variable en el espacio y en profundidad. Los errores de estimación pueden tener un coeficiente de variación que se puede suponer del orden de 0,5, lo que introduce una gran incertidumbre en los resultados.

La modelización matemática del flujo en el acuífero es una poderosa herramienta para encuadrar los valores del balance de agua con los datos hidrométricos, buscando su afino por calibración y validación y por lo tanto reduciendo la incertidumbre de la evaluación de los recursos de agua subterránea en condiciones de explotación y su evolución, con posibilidad de hacer estimaciones futuras en escenarios no lejanos que no se alejen de las situaciones históricas utilizadas. En Canarias se han construido modelos numéricos insulares de Gran Canaria (antiguos y un tanto obsoletos) y de Tenerife (actualizados varias veces para el Plan Hidrológico) y de áreas concretas en el valle de La Aldea (Gran Canaria, Cruz-Fuentes, 2014a) y del Macizo de Betancuria (Fuerteventura, Herrera y Custodio, 2014). Sin embargo, estos modelos son tienen bastante incertidumbre en los resultados a causa de la propia de las variables a reproducir y la de los parámetros que los conforman. En los casos insulares, la incertidumbre asociada a las condiciones de contorno laterales es pequeña por tratarse del borde costero, pero sin embargo el límite inferior está mal definido. Esta última circunstancia es de moderada relevancia en el interior de la isla, pero puede ser importante a lo largo de la periferia. Uno de los puntos más débiles es el pobre conocimiento de los parámetros hidráulicos de las formaciones geológicas, que además es muy difícil de mejorar en la práctica. Sin restar interés e importancia a esos modelos numéricos de flujo, que sin duda lo tienen, en especial el de Tenerife por sus sucesivas actualizaciones y ser una buena herramienta de toma de decisiones y planificación, no dejan de estar asociados a una notable incertidumbre de los resultados, que es difícil de reducir, por lo que se requiere prudencia en su utilización. Es posible obtener otras buenas calibraciones con resultados diferentes, además de que el ajuste a los datos (que son también inciertos) que da el mínimo error numérico no necesariamente respalda una más precisa simulación.

En Gran Canaria y especialmente en Tenerife los resultados aplicados a la planificación hídrica son notablemente sensibles al agotamiento de reservas de agua subterránea y a la irregularmente repartida descarga de agua subterránea al mar a lo largo de la costa, que puede ser importante. Además, la lenta evolución temporal tiene una gran relevancia en cuanto a la evaluación de escenarios futuros. Nótese, por demás, que las desigualdades territoriales afectan no solo a los acuíferos, de los cuales hacen poco uso las versiones últimas de la planificación, sino a las masas de agua.

LA INCERTIDUMBRE EN LOS ASPECTOS ECONÓMICOS, ADMINISTRATIVOS Y SOCIALES DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

El conocimiento hidrogeológico de Gran Canaria y de Tenerife es de moderado a pobre, lo que no excluye que sean unas de las islas volcánicas mejor conocidas. Es una valoración relativa a la importancia económica y social que tiene en ellas el agua subterránea, que habría requerido un mayor esfuerzo de conocimiento, observación e institucional que el que se tiene actualmente, y que además se hace con menor intensidad y dedicación que lo que

se hacía hace varias décadas.

No sólo hay incertidumbres hidrogeológicas sino que también existen y son grandes las referentes al valor económico y social del agua subterránea en Canarias. A esto se suma un cierto comportamiento errático de la administración pública insular, un intervencionismo no clarificado teniendo en cuenta la historia del comportamiento del sector privado, una pérdida de capacidad técnica sustituida por una creciente intervención política, sin una contrapartida suficientemente eficaz y decidida de los usuarios y de la sociedad civil. Los aspectos socio-económicos juegan un papel clave en la gestión del agua subterránea.

La gobernanza de las aguas subterráneas, como parte de la gobernanza del agua, y ésta de la gobernanza en general, debe cumplir sus cometidos en todas las circunstancias y por lo tanto bajo incertidumbre también. El actuar, decidir, acordar y avanzar, resolviendo los problemas de cada momento, tanto internos como de relaciones con el exterior, debe tener en cuenta esa incertidumbre.. Eso supone flexibilidad legal y administrativa, lo que no es la actual situación en España, aunque con reglas para evitar la arbitrariedad, oportunismo, corrupción y despilfarro de recursos humanos y económicos, evitando la conflictividad social y la litigiosidad. En Canarias, el hecho del aislamiento entre las islas, que impide la transferencia de agua física significativa entre ellas, crea un marco especial de gobernanza.

La gobernanza requiere de normas, administración pública e involucración de los usuarios y de la sociedad en general, con capacidad para abordar e internalizar la incertidumbre. La Ley de aguas canaria y su ley de referencia, la Ley de aguas española, es muy rígida y consolida derechos de uso del agua, lo que no favorece la gestión cuando los valores en que se basa son inciertos en situaciones en que la demanda potencial de agua subterránea es del mismo orden de magnitud o superior a los valores que se han calculado. De hecho esta una de las razones de la dificultad para aprobar los planes hidrológicos de las demarcaciones. Tal es el caso de Gran Canaria y Tenerife, aunque en ellas la existencia de comercio y mercados del agua ha favorecido el acople entre oferta y demanda de forma flexible, aunque con precios elevados –reflejan la escasez—pero a costa de interferencias y efectos sobre el medio ambiente. Faltan estudios respecto a los efectos sobre el medio ambiente y sus servicios ecológicos. No parece que su hipotética restauración se pueda hacer a un coste asumible frente a los beneficios que se derivarían, aunque estas aseveraciones entrañan gran incertidumbre. La intervención de la administración pública ofertando agua a precio controlado no afecta directamente a la incertidumbre de la gestión pero lo hace indirectamente por las distorsiones económicas que acaban encubriendo subvenciones que se pagan con fondos públicos a los que la sociedad podría haber dado otro destino, sin implicar que eso sea bueno o malo pero sí una nueva forma de incertidumbre poco o nada valorada.

Para la reducción de la incertidumbre asociada al uso y gestión –gobernanza-- de las aguas subterráneas, hasta donde es física y económicamente posible, se requieren estudios y sobre todo observaciones, el análisis periódico y por expertos de los datos obtenidos, transparencia y su puesta a disposición de todos. Aquí es donde los usuarios del agua subterránea podrían y deberían implicarse, conjuntamente con la administración del agua, participando en buena manera en el coste y la realización de las observaciones, hasta el nivel en que los beneficios netos que proporciona el agua subterránea lo requieran y permitan. Esto ha sido planteado en ocasiones en Canarias, pero sin efecto, ya sea por falta de concienciación y/o conocimiento, por falta de instituciones y por resistencia de la propia administración del agua que a nivel general –con excepciones-- no comprende la situación, no está preparada para afrontarla, quiere seguir limitándose a lo dispuesto normativamente o no quiere perder sus prerrogativas. Tampoco el estamento político parece querer afrontar la gobernanza del agua subterránea bajo incertidumbre ya que en Canarias el agua produce réditos políticos, aunque cada vez menores.

CONSIDERACIONES FINALES

En el estado actual de conocimiento no es posible dar evaluaciones contrastadas de las incertidumbres de los valores de los recursos de agua subterránea en Gran Canaria y Tenerife, aunque algunos datos elaborados y consideraciones expertas permiten primeras aproximaciones groseras en forma de coeficiente de variación (CV), referido a conjuntos insulares, tanto para valores medios a largo plazo como para los valores anuales. La estimación de la recarga a los acuíferos, que es relativamente importante, puede tener un CV de 0,2 a 0,3 o incluso hasta 0,4 de acuerdo con el balance de deposición atmosférica de cloruros. Al evaluar los recursos, dado que las extracciones son conocidas con una incertidumbre probable de 0,1 en Tenerife y quizás de 0,2 en Gran Canaria, sería posible afinar los balances, pero las salidas al mar y en especial el consumo de reservas son muy inciertos, sobre todo en Tenerife, con lo que los recursos de agua subterránea en ambas islas pueden tener un CV estimable groseramente en 0,2 a 0,3 o incluso algo más. Aunque la incorporación de nuevos recursos de agua puede hacer disminuir la incertidumbre de los recursos de agua totales, las aguas subterráneas son cuantitativamente dominantes y previsiblemente lo continuarán siendo en las próximas décadas. A las incertidumbres de la cantidad de agua subterránea, dejando de lado la creciente importancia de la calidad, se une la de los costes crecientes y la de si se va a disponer de inversiones para mantener la producción del sistema de captación de agua subterránea, lo que se traduce en incertidumbre creciente de la demanda de agua. Estas son las condiciones en que se han de gestionar los acuíferos, o sea de la gobernanza, en un marco de incorporación de nuevos recursos e intervención administrativa creciente, pero también de más presión por parte de los usuarios de agua, con una composición y requisitos que son cambiantes en el tiempo. Para abordar y resolver los problemas planteados de forma socialmente eficiente, al menor coste y con garantía, se requiere una nueva forma de relación entre la administración y los usuarios del agua, dentro del deseable cambio de paradigma en el uso del agua, en el que se redistribuyan los papeles y responsabilidades, siendo la final la de la administración, con mucha mayor vinculación institucional y económica de los usuarios. Son condicionantes nuevos a desarrollar y necesarios para internalizar la incertidumbre.

AGRADECIMIENTOS

Se han utilizado ideas recogidas durante el desarrollo del Proyecto MASE (Minería del Agua Subterránea en España), que con el apoyo económico de Aqualogy y la supervisión de CETaqua se desarrolla en el Departamento de Ingeniería del Terreno de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Barcelona. A dicho proyecto han contribuido numerosos expertos canarios, a los que se agradece su importante aportación.

REFERENCIAS

Alcalá, F.J., Custodio, E. (2014). *Spatial average aquifer recharge through atmospheric chloride mass balance and its uncertainty in continental Spain.* Hydrol. Proces., 28: 218–236.

Cabrera, M.C.; Naranjo, G.; Cruz–Fuentes, T.; Hernández–Quesada, P.; Benavides, A.; Estévez, E.; Martín, L.F., Custodio, E. (2013). *Aplicación del balance de cloruros para la estimación de la recarga natural al acuífero del norte de Gran Canaria.* X Simposio de Hidrogeología. Granada. Hidrogeología y Recursos Hidráulicos. Asociación Española de Hidrogeólogos. Madrid: 499–508.

Cruz–Fuentes, T.; Heredia, J.; Cabrera, M.C.; Custodio, E. (2014a). *Behaviour of a small sedimentary volcanic aquifer receiving irrigation return flows: La Aldea, Gran Canaria, Canary Islands (Spain).* Hydrogeology Journal. DOI 10.1007/s10040–013–1094–9.

Cruz-Fuentes, T., Naranjo Ayala, G., Cabrera Santana, M.C., Custodio, E. (2014b). *Estimación de la escorrentía superficial mediante la generación automática del número de curva con un SIG: aplicación al norte de Gran Canaria (Islas Canarias, España).* En: J. Gómez-Hernández y J. Rodrigo-Ilarri, II Congreso Ibérico de Aguas Subterráneas, Valencia. Ed. Universidad Politécnica de Valencia: 217-232.

Custodio, E. (2009). *Estimation of aquifer recharge by means of atmospheric chloride deposition balance.* Contributions to Science 5(2): 81–97.

Custodio, E., Llamas M.R. (1976). *Hidrología subterránea.* Ediciones Omega. Barcelona: 1–2350.

Custodio, E., Llamas, M.R., Samper, J. (eds.) (1997). *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica.* Instituto Tecnológico Geo–Minero. Madrid: 1–455.

De Vries, J.J., Simmers, I. (2002). *Groundwater recharge: an overview of processes and challenges.* Hydrogeology Journal, 10(1): 5–17.

Espinosa, S. (2014). *Estimación de la recarga media anual de acuíferos: aplicación al Baix Ebre.* Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería del Terreno, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona: 1-286.

Herrera, Ch., Custodio, E. (2014). *Groundwater flow in a relatively old oceanic volcanic island: the Betancuria area, Fuerteventura Island, Canary Islands, Spain.* Science of the Total Environment (STOTEN) (en prensa).

Lerner, D.N., Issar, A.S., Simmers, I. (1990). *Groundwater recharge. A guide to understanding and estimating natural recharge.* International Association of Hydrogeologists, International Contributions to Hydrogeology 8. Heise: Hannover; 1–345.

Naranjo, G., Cruz-Fuentes, T., Cabrera, M.C., Martín, L.F., Custodio, E. (2014). *Avances en la estimación de la recarga natural mediante la aplicación del método del balance de cloruros atmosféricos al acuífero del norte de Gran Canaria.* En: J. Gómez-Hernández y J. Rodrigo-Ilarri, II Congreso Ibérico de Aguas Subterráneas, Valencia. Ed. Universidad Politécnica de Valencia: 217-232.

Samper, J. (1998). *Evaluación de la recarga por la lluvia mediante balances de agua: utilización, calibración e incertidumbres.* Boletín Geológico Minero, 109: 31–54.

Samper, J., Huguet, Ll., Ares, J., García-Vera, M.A. (2005). *User's guide VisualBALAN v.2.0: código interactivo para la realización de balances hidrológicos y la estimación de la recarga.* E. T. Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, A Coruña: 1-150.

Scanlon, B.R., Healy, R.W., Cook, P.G. (2002). *Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge.* Hydrogeology Journal, 10(1): 18–39.

ISBN: 978-84-938046-4-0

DISPONIBILIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS EN LA ISLA DE TERCEIRA

José Carlos FONTES[1], Francisco C. RODRIGUES[2] y Juan C. SANTAMARTA[3]

[1]Universidade dos Açores, Departamento de Ciências Agrárias, 9700 Angra do Heroísmo. jfontes@uac.pt
[2]Universidade dos Açores, Departamento de Ciências Agrárias, 9700 Angra do Heroísmo. cota@uac.pt
[3]Universidad de La Laguna. Área de Ingeniería Agroforestal. Tenerife. jcsanta@ull.es

RESUMEN

La isla de Terceira (Azores), con una extensión cercana a 400 km^2, está formada por tres grandes estratovolcanes, compuestos por materiales volcánicos de naturaleza efusiva y muy explosiva. En estos materiales, el movimiento de las aguas subterráneas comprende una zona no saturada con el flujo predominantemente vertical, hasta llegar a la zona saturada. Esta zona consiste en un cuerpo lenticular de agua dulce, base del acuífero, con una cota cercana al nivel del mar, limitado inferiormente por la mezcla entre el agua dulce y el agua salada del mar. La escorrentía proviene de los cursos de agua que fluyen por los barrancos ocupados por la vegetación natural, el pastoreo, y los pastizales con una rotación maíz-pastos. El recurso hídrico, cualquiera que sea su procedencia, superficial o subterránea, es utilizado para el suministro urbano, la agricultura y el suministro industrial. El volumen de agua de procedencia subterránea en la isla de Terceira se puede establecer en una media de 5,4 hm^3, la agricultura consume 1,6 hm^3 del total. El agua superficial, se suele almacenar en estanques artificiales y depósitos. Su uso principal, es el agropecuario, estimándose en 3,1 hm^3.

Palabras clave: *Recursos Hídricos, Disponibilidad, Escorrentía, Azores.*

ABSTRACT

Terceira Island (Azores) with an area nearly 400 km^2, consists of three large stratovolcanoes composed of volcanic materials very effusive and with explosive nature. In these materials, the movement of groundwater comprises a predominantly unsaturated with vertical flow, up to the saturated zone. This area consists of a lenticular body of fresh water aquifer base, with a height close to sea level, bounded below by the mixing zone between fresh water and salt water from the sea. Runoff comes from watercourses flowing through the ravines occupied by natural vegetation, grazing, and pasture with a corn-grazing rotation. water resources, whatever their source, surface or underground, is used for urban supply, agricultural and industrial supply. The water balance, as groundwater sources, on the island of Terceira, can be set at an average of 5.4 hm^3, agriculture consumes 1.6 hm^3, of the total. The surface water is usually stored in artificial ponds and reservoirs, their primary use is agricultural, estimated at 3.1 hm^3.

Key words: *Water Resources Availability, Runoff, Azores.*

INTRODUCCIÓN. CONDICIONANTES HIDROLÓGICOS

La isla de Terceira pertenece al grupo central del archipiélago de las Azores, entre las latitudes 38º 38 '10 "N y 38º 47' 40" N y longitud 27º 03 '00 "W y 27º 24' 00" W (Figura 1). Como el resto de las nueve islas de las Azores, pertenece a la región denominada Macaronesia que también incluye a los archipiélagos de Madeira, Salvaje, Canarias y Cabo Verde. En términos de superficie, la isla de Terceira ocupa aproximadamente 401,6 km^2 (17,1% de la superficie total del archipiélago), con una longitud y anchura máxima de 29 y 17,5 kilómetros.

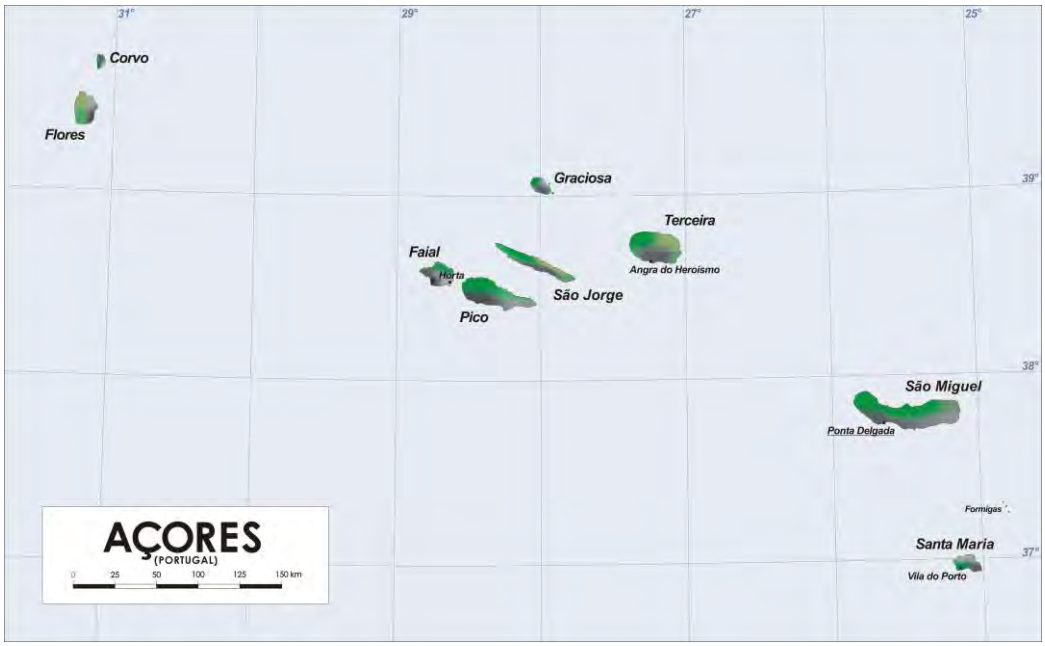


Figura 1. El archipiélago de Azores, en el grupo central se puede localizar la isla de Terceira.

Geomorfología y Geología

De modo general, la geomorfología de las islas jóvenes de naturaleza volcánica es compleja. Se caracteriza por una orografía abrupta y elevadas altitudes. Estos rasgos condicionan la hidrología de estos territorios, induciendo especificidades hidrometerológicas locales, la formación de la escorrentía superficial y la hidrodinámica del agua subterránea. El origen, la geología y el proceso de formación de las islas volcánicas condicionan notablemente el aprovechamiento, uso y, efectos, tanto positivos y negativos, de los recursos hídricos en el medio insular (Santamarta, 2013).

La isla de Terceira se divide en cuatro unidades estructurales principales, que consisten en los estratovolcanes de los Cinco Picos de Guilherme Moniz y Santa Bárbara, Pico Alto, así como, una franja deprimida, situada entre estas dos erupciones volcánicas, Zona de Transición

La isla de Terceira, como la mayoría de los edificios volcánicos atlánticos, es el resultado de una serie de procesos volcánicos y tectónicos, que incluye una fase proto-insular, caracterizada por erupciones submarinas, que van formando un volcán sumergido hasta alcanzar la superficie del mar, continuando con una actividad eruptiva subaérea (Self, 1974).

No se han identificado formaciones y estructuras geológicas de esa primera fase, aunque se admite su presencia en niveles estratigráficos más profundos. Las formaciones subaéreas se corresponden con basaltos alcalinos y productos resultantes de su diferenciación (Schmincke et al., 1972; Schilling, 1975), en particular, hawaiitas, benmoreitas y traquitas de naturaleza comendítica y pantelerítica (Self, 1974).

Hidrografía

La isla de Terceira tiene un alto número de cuencas hidrográficas, con cursos de agua irregulares con perfiles jóvenes. Estos cursos son esencialmente exorreicos, desembocando los cursos del agua en el mar.

La red de drenaje está dispuesta predominantemente de forma radial, alrededor de las tres masas estructurales (Figura 2), Los lechos de los barrancos tienden a ser irregulares. Es frecuente que los cursos de agua presenten desniveles bruscos, asociados a discontinuidades litológicas o accidentes tectónicos (Rodrigues, 1993). Los cursos de agua en algunas ocasiones son permanentes, aunque lo normal, es que aparezcan, tras periodos de lluvia, su aprovechamiento se realiza mediante tomaderos de barranco.

En la isla también hay cuencas endorreicas que desembocan en: lagos, charcas, pantanos y turberas. Según Rodrigues (2002), este efecto viene determinado por varios factores en relación a la hidrología, geomorfología, edafología y la vegetación asociada. La retención de agua en las turberas es la más importante desde el punto de vista hidrológico. Se asocia a formaciones del género *Spagnum* que se presentan en las zonas más húmedas, del interior de la isla y en la parte superior de los grandes macizos volcánicos.

Las características foliares de la cobertura vegetal, permite la interceptación y retención del agua, en una proporción volumétrica que ronda 10 veces la masa vegetal.

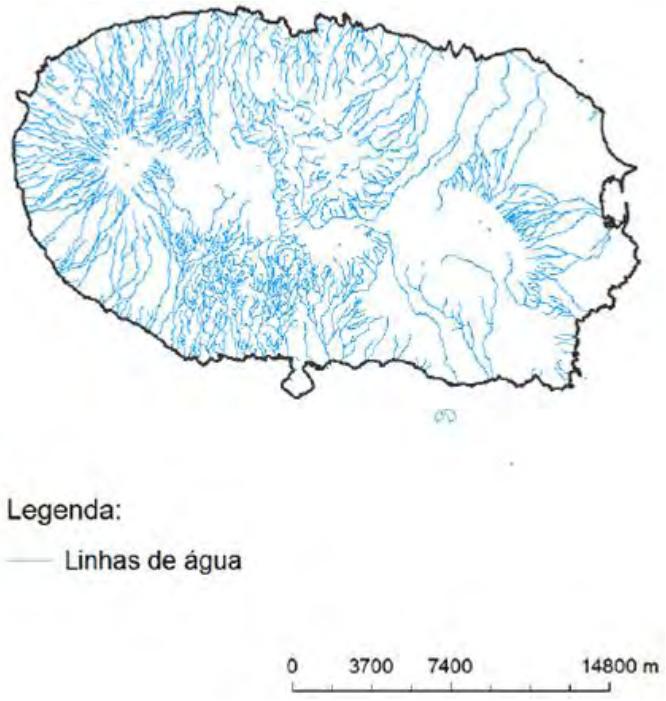


Figura 2. Mapa hidrográfico de la Isla Terceira.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Balance hídrico superficial

La precipitación media en la isla de Terceira es 1647 mm, su cálculo se hace a partir de cuatro estaciones ubicadas desde una cota de 53 msnm hasta una cota de 770 msnm. La precipitación tiene una fuerte variación con la altitud y ocurre todos los meses del año, no obstante, se comprueba que aproximadamente el 75% de la precipitación ocurre en el periodo de octubre a marzo. La relación entre el mes más lluvioso y el mes más seco es de tres, lo que hace un régimen constante de lluvias. La variabilidad interanual es baja, alrededor de 1,5, lo que condiciona la disponibilidad del agua, ya sea superficial o subterránea. La disponibilidad de agua está sujeta a la evapotranspiración real, que muestra una variabilidad débil en la isla, siendo los valores medios de 599 mm/año. Los términos de balance hídrico anual, se complementan con una escorrentía de 131 mm/año y 917 mm/año de recarga.

Hidrología subterránea

La alta permeabilidad que caracteriza al núcleo rocoso de la isla es la responsable de los procesos hidrogeológicos subterráneos que se procesan en la zona saturada, constituida por un cuerpo hídrico que flota sobre el agua salada procedente de infiltraciones del mar, es el denominado —acuífero de base—. Existe también, una zona no saturada, situada mayoritariamente en las partes emergidas de la isla, donde la existencia de niveles bajos de permeabilidad, tales como paleosuelos, depósitos piroclásticos alterados y coladas compactas, originan puntualmente acuíferos colgados.

Todos los modelos hidrológicos aceptados para Terceira admiten la existencia de esta masa de agua, —acuífero insular—, aunque pueden diferir en aspectos relacionados con la geometría y localización, (Mendonça, 1991, Meneses y Rodrigues, 1993, Bjarnason, 1993 y Rodrigues, 2002). En este trabajo se siguen los modelos propuestos por Meneses y Rodrigues (1993) y Rodrigues (2002).

Sistemas de acuíferos colgados

Los acuíferos colgados, —también conocidos como acuíferos suspendidos— o, perched water en zonas como el archipiélago de Hawaii (Santamarta, 2013), son el resultado de la retención de una fracción de agua por encima del nivel de piezométrico del acuífero de base de la isla, en la zona no saturada. Su presencia se evidencia en los patrones de distribución lateral y vertical de los nacientes, —manantiales—, así como por las características hidrogeológicas de los pozos que interceptan. Las propiedades y configuración de las propiedades hidráulicas de estos cuerpos hídricos dependen de características como: espesor, continuidad, paleorelieve, grados de fracturación y el estado de alteración. También dependen de las características hidráulicas del medio rocoso saturado.

En la isla de Terceira, este tipo de acuíferos se localiza en las vertientes de los tres estratovolcanes insulares, estando los más productivos en el interior de las calderas de Guilherme Moniz y Cinco Picos.

En la Tabla 1 se presentan las principales familias de los acuíferos colgados de la isla de Terceira, así como el número de puntos de descarga, la descarga media, litología de la formación saturada (Rodrigues, 2002). Los acuíferos más productivos de la isla se

Tabla 1. Sistemas de acuíferos colgados en la isla de Terceira, señalando el número de puntos de agua, descargas acontecidas de la formación acuífera (modificado de Rodrigues, 2002).

	Sistema Aquífero	Pontos de água		Q (ls^{-1})	Formaciones Aquiferas
		Mananciales	Pozos		
Macizo de Cinco Picos	Lages 1	1	44	1,0	Piroclastos (ignimbritas de Lajes)
	Cume 1	40	1	1 - 7	Piroclastos (ignimbritas, lapilli y escorias)
	Cinco Picos 1	-	3	5	Coladas basalticas inferiores
	S. Sebastião	7	23	5 - 7	Depósitos piroclasticos (depósitos freato-volcanicos de S. Sebastião)
	Ribeirinha 1	2	-	0,5	Coladas lávicas (traquibasaltos de Cinco Picos)
	Santiago	3	-	0,2	Coladas lávicas (traquibasaltos de Cinco Picos)
	Lages	2	3	2	
	Cume 2	12	-	2	
	Cinco Picos 2	-	2	20	
	Cinco Picos 3	-	6	100	
	Ribeira Seca	3	-	0,3	
	Ladeira Grande	1	-	0,1	
	Ribeirinha 2	1	-	0,1	
Macizo de G. Moniz-Pico Alto	Agualva	18	-	16 - 27	Coladas lavicas (formacion peralcalina de Pico Alto) y piroclastos (cenizas, obsidianas, pómez y ignimbritas)
	Quatro Ribeiras	28	-	18 - 43	
	Tombo	6	-	1 - 4	
	Cabrito	3	-	45 - 98	Coladas lávicas (basaltos superiores)
	Fonte da Telha	5	-	6 - 28	Coladas lávicas (traquitas de G. Moniz)
	Alagoa	1	-	8 - 15	Coladas lavicas (traquitas de Guilherme Moniz) y piroclastos (ignimbritas de Lajes)
	Nasce Água	5	-	50 - 96	Coladas traquiticas de Guilherme Moniz
Macizo de Santa Bárbara	Santa Bárbara	1	-	0,01	Depósitos piroclasticos (pomez)
	Doze Ribeiras	1	-	0,06	
	Serreta	8	-	1 - 5	
	Raminho	6	-	1 - 4	
	Altares	4	-	1 - 3	Depositos piroclasticos (pomez y lahares)
	Cales	2	-	0,15	Coladas lávicas (formacion peralcalina de Santa Bárbara)
	Rib. dos Gatos	2	-	0,01	
	Fajã da Serreta	2	-	0,01	

encuentran en coladas lávicas, en las formaciones peralcalinas de Pico Alto y las formaciones traquibasálticas de Cinco Picos.

El macizo de los Cinco Picos es el que mayor número de acuíferos colgados tiene, agrupándose en un grupo que engloba unidades hídricas poco profundas, asociadas a una litología variada. Otro grupo, más profundo, surge en coladas lávicas (traquibasaltos de Los Cinco Picos).

Los acuíferos Cinco Picos, 1, 2 y 3, se localizan en el interior de la caldera del mismo nombre. Los dos más profundos representan niveles hidroestáticos de 295 a 254 m de altitud, con continuidad a través de la caldera. Estos datos has sido observados gracias a al reciente apertura de pozos en el sector norte de esta depresión, así como, trabajos de explotación geofísica llevados a cabo en la última década.

De todos los macizos insulares, el de Santa Bárbara, es el que presenta menor número de acuíferos colgados, con reducidos caudales. Estos acuíferos son superficiales, algo continuos, localizándose en materiales piroclásticos de naturaleza pumítica.

Sistema de acuífero de base

Existe una masa de agua en el cuerpo basal de la isla, flotando sobre el agua de mar, como se evidencia en la isla de Terceira por el número de perforaciones realizado, alcanzando el nivel del mar (Paradela, 1974 y 1980; Rodrigues, 1993 y 2002).

La presencia de esta masa de agua y su flotabilidad en las aguas marinas, gracias a la diferencia de densidad entre el agua salada y el agua dulce, depende del volumen de agua infiltrado y la conductividad hidráulica de los materiales (Falkland y Custodio, 1991).

La información directa referente a la localización del nivel piezométrico del acuífero en la costa proviene de observaciones efectuadas en pozos construidos a menos de 5 km de la costa, así como, numerosos nacientes que descargan a lo largo de la línea de costa. El análisis de su situación en el interior de la isla se realiza a través de testificación de sondeos geotérmicos construidos recientemente, con profundidades de 250 m, para el abastecimiento energético de la isla, durante el año 2014.

Las descargas medidas en los principales acuíferos colgados es de 276 L/s, que corresponden a 22 mm por año. De los 917 mm que se infiltran en la superficie del suelo, 895 mm recargan el acuífero base.

REFERENCIAS

Bjanarson, B., (1993). *Groundwater on Small Oceanic Islands. Some Problems and Solutions.* Comunicação apresentada no Seminário Recursos Hídricos e o Ambiente na Região Autónoma dos Açores. Câmara Municipal de Angra do Heroísmo. 10p.

Falkland, A., E Custódio, E., 1991. *Hydrology and water resources of small islands: a pratical guide.* Ed. A. Falkland. UNESCO. 500p.

Mendonça, J.L.L., (1991). *Prospeção de águas para o abastecimento da Madalena (Pico):* obra nº 2318. Rel. Técnico Final. Sondagens e Fundações A. Cavaco. 19p.

Meneses, J.G.A., (1993). *Hidrologia e Hidrogeologia da Ilha Terceira – Grandes Condicionantes*. Comunicação apresentada no Seminário Recursos Hídricos e o Ambiente na Região Autónoma dos Açores. Câmara Municipal de Angra do Heroísmo. 1-56.

Meneses, J.G.A. Rodrigues, F.C. (1993). *Recursos Hídricos numa Região Vulcânica Insular, o caso da ilha Terceira*. Anais do 2ª Congresso da Água , III: 161-174.

Paradela, P.L.,(1974). *Sondeos de pesquisa y captacion en las Azores.* Proceedings do Simposio Internacional sobre Hidrologia de Terrenos Volcanicos. Lanzarote, Canarias. 11p.

Paradela, P.L.,(1980). *Hidrogeologia Geral das ilhas Adjacentes.* Comunicações, Serviços Geológicos de Portugal, 66:241-256.

Rodrigues, F.C., (1993*). Estudo Hidrogeológico da Ilha Terceira: contributo para o seu conhecimento*. Provas de Apt. Cap. Ped. Científica. Dep. Ciências Agrárias. Univ. dos Açores. p. 139.

Rodrigues, F.C. (2002). *Hidrogeologia da Ilha Terceira (Açores, Portugal).* Tese de Doutoramento. Universidade dos Açores, Angra do Heroísmo. 500p.

Schilling, J.G., (1975). *Azores Mantle Blob: Rare-Earth evidence*. Earth and Planetary Science Letters, 25:103-115.

Schmincke, Hans-Ulrich e Wiebel, M., (1972). *Chemical study of rocks from Madeira, Porto Santo and São Miguel and Terceira (Azores)*. N. Jarbuch F. Mineralogie Abhandlugen B.D., 117(3): 253-281.

Santamarta J.C. et al. (2013). *Hidrología y Recursos Hídricos en Islas y Terrenos Volcánicos*, Colegio de Ingenieros de Montes: Madrid. 556 pp.

Self, S. (1974). *Recent volcanism on Terceira, Azores*. PhD thesis. London University, Imperial College.

ISBN: 978-84-938046-4-0

APORTACIONES DE CANARIAS AL SECTOR DE AGUA Y SANEAMIENTO EN CABO VERDE (2010 -2014)

Gilberto MARTEL RODRÍGUEZ[1], Baltasar PEÑATE SUÁREZ[1] y Juana R. BETANCORT RODRÍGUEZ[1]

[1] Departamento de Agua. Instituto Tecnológico de Canarias. Playa de Pozo Izquierdo s/n 35119.
gmartel@itccanarias.org

RESUMEN

Desde 2010 se ha ido consolidando la cooperación Canarias - Cabo Verde en materia de gestión, tratamiento y utilización de los recursos hídricos. Canarias, dadas sus similitudes con Cabo Verde y su buen hacer, se ha convertido en un actor más del proceso de reforma del sector de agua y saneamiento en Cabo Verde. La primera iniciativa de cooperación pública liderada por el Instituto Tecnológico de Canarias (proyecto PECAVE) estaba centrada en el apoyo a la planificación hidráulica sostenible a través de la organización de seminarios participativos y del intercambio de experiencias con entidades público-privadas. Más recientemente el proyecto ISLHáGUA - cofinanciado por la Unión Europea, ha abordado todos los puntos estratégicos del sector. Este trabajo presenta las principales aportaciones de estos proyectos dentro del sector del Agua y Saneamiento. Desde la realización de más de 60 campañas de sensibilización entre escolares, pasando por el fortalecimiento de las capacidades de los laboratorios de aguas, mejoras de reducción de los coste energéticos en desalación, diseño de varios sistemas de tratamiento de aguas residuales por tecnologías de bajo coste energético o de desalación autónoma con energías renovables y la redacción del Plan Director de reutilización segura de las aguas regeneradas de Praia.

Palabras clave: *Agua, Saneamiento, Cooperación, Sensibilización, Transferencia*

ABSTRACT

During the period 2010-2014 cooperation between the Canary Islands and Cape Verde has been gradually developing in terms of production, management, treatment and use of water resources. Currently, the Canary Islands has become one more actor in the water and sanitation sectors reform process in Cape Verde given its similarities to Cape Verde and thanks to the good work done. The first initiative of public cooperation was launched led by the Instituto Tecnológico de Canarias (PECAVE project). It was focused on the support to the water resources sustainable planning through the organization of participatory workshops and the promotion of experiences exchange with public and private entities. Following here, starts another Project called ISLHáGUA – co-funded by the European Commission, which has dealt with all the strategic points of the sector. This work presents the main contributions of these projects within the Water and Sanitation sector. From the implementation of more than 60 awareness school workshops, capacity building for the water quality control laboratories, specific work to reduce desalination energy costs, detailed projects for low

energy cost wastewater treatment technologies or autonomous desalination using renewable energy and the Plan for enable safe reusing of reclaimed water of Praia.

Keywords: *Water, Sewage, Cooperation, Awareness, know-how transfer.*

INTRODUCCIÓN

Durante el período 2010-2014 se ha venido desarrollando de forma paulatina la cooperación entre Canarias y Cabo Verde (Figura 1) en materia de producción, gestión, tratamiento y utilización de los recursos hídricos. Este proceso ha sido liderado por el Instituto Tecnológico de Canarias, a través de diversas iniciativas y proyectos, y ha contado con la colaboración de numerosas empresas público-privadas canarias e instituciones públicas o sin ánimo de lucro de Cabo Verde. Actualmente Canarias, dadas sus similitudes con Cabo Verde y su buen hacer, se ha convertido en un actor más del proceso de reforma del sector de agua y saneamiento en Cabo Verde.

La financiación de la Dirección General de Relaciones con África, el liderazgo del Instituto Tecnológico de Canarias y la participación de diversas entidades públicas y empresas privadas de Canarias y de Cabo Verde, permitió iniciar en 2010 la primera iniciativa de cooperación pública centrada en el apoyo a la planificación sostenible de los recursos hídricos a través de técnicas participativas y de intercambio de experiencias.

Figura 1. Imagen satélite de las islas de Cabo Verde. Fuente: Google Earth

Esta actividad, denominada Proyecto PECAVE, sentó las bases para el diseño de acciones más específicas y que, en su conjunto, abarcaron los diferentes aspectos del ciclo del agua con el objetivo de reforzar las capacidades de las islas en la gestión sostenible de los recursos hídricos. Se estableció una metodología participativa para promover la generación de sinergias entre los participantes caboverdianos y, a su vez, con los agentes canarios y otras instituciones implicadas como las agencias de cooperación al desarrollo. Esto permitió mejorar la colaboración y cooperación futura y la promoción de la gestión sostenible del agua en Cabo Verde. De forma complementaria a la recopilación de información y misiones de diagnóstico, se organizaron a principios de 2010, jornadas técnicas de intercambio de experiencias y seminarios de planificación y gestión sostenible de los recursos hídricos. Los resultados de dichos eventos fueron muy satisfactorios, dando lugar a la publicación de un documento que recoge el diagnóstico, las visiones de futuro y las propuestas de acción emanadas del trabajo de los cuatro grupos funcionales definidos: Administración pública, Agencias de cooperación y técnicos, Sector empresarial público/privado y Sociedad civil (Martel y Peñate, 2011).

De las propuestas de líneas de actuación y medidas en el sector Agua en Cabo Verde definidas en este proceso, surge la iniciativa de aprovechar la oportunidad del Programa de Cooperación Transnacional Madeira-Açores-Canarias, que en su Eje 3 preconizaba como

objetivo el de reforzar el papel de las regiones ultraperiféricas como plataforma para la cooperación territorial entre la Unión Europea y los países vecinos (www.pct-mac.org), para presentar un proyecto colaborativo entre Canarias y Cabo Verde para reforzar las capacidades para la gestión de los recursos hídricos en islas. En este proyecto, identificado con el acrónimo ISLHáGUA (www.islhagua.org) (mezcla entre los términos isla y agua en español y portugués), se implicaron desde el principio INGRH, la Asociación Nacional de Municipios de Cabo Verde, la Universidad de Cabo Verde, la Mancomunidad del Sureste de Gran Canaria y el ITC como líder y promotor del proyecto. La configuración de esta asociación de entidades diversas, desde gubernamentales y académicas hasta vincular al poder local, se estableció como estratégica para que las acciones fueran avaladas técnica y administrativamente y que finalmente pudieran ser llevadas a la práctica garantizando su continuidad en el tiempo. Los socios caboverdianos cuentan a su vez con financiación por parte del instrumento europeo de financiación de la Cooperación al Desarrollo FED (Fondo Europeo de Desarrollo).

Gracias a estas actuaciones la presencia de empresas e instituciones canarias de confianza en Cabo Verde se ha consolidado, dando sus frutos. Numerosas auditorias en desalación, estudios sobre el flúor, estudios sobre reutilización, campañas de sensibilización, instalación de pequeñas desaladoras, adquisición de equipamiento de laboratorio, diseño y construcción de sistemas de depuración natural a pequeña escala, presentación a concursos internacionales, etc. son el aval de este éxito.

MARCO GEOGRÁFICO, HIDROLÓGICO Y ADMINISTRATIVO DE LA GESTIÓN DE AGUAS EN CABO VERDE

El archipiélago de Cabo Verde, formado por diez islas y trece islotes, está situado a unos 1.300 km al sur de las islas Canarias y a unos 500 km al oeste de Dakar (Senegal). Las islas occidentales son relativamente altas y de relieve accidentado, mientras que las orientales son bajas y llanas. En total las islas cubren una extensión de unos 4.033 km^2, algo más de la mitad que Canarias, y cuenta con una población total residente en torno al medio millón de habitantes (Instituto Nacional de Estadística de Cabo Verde, 2010), menos de una cuarta parte de la población total de Canarias.

Las lluvias en Cabo Verde son resultantes del Frente Intertropical que provoca una estación húmeda de julio a octubre. Las precipitaciones se concentran durante los meses de agosto y septiembre, periodo durante el cual cae entre 60% a 80% de la cantidad anual de lluvias (PECAVE, 2011). La cantidad de lluvia de las islas varía según su topografía y su latitud. Las islas montañosas y lluviosas son Fogo, Santiago, Brava y Santo Antão con un clima semiárido y precipitación entre 200 y 500 mm anuales. São Vicente, São Nicolau y Maio tienen un clima árido con precipitación entre 100 y 200 mm. Por último las islas situadas en la parte Este del archipiélago son las que menos precipitación reciben, menos de 100 mm/año y un clima extremadamente árido, se trata de las islas de Sal y Boa Vista. A ello hay que añadir que la tasa de evaporación en Cabo Verde es muy alta (valor medio anual estimado 2.354 mm durante un periodo de 30 años). La fuente tradicional de los recursos hídricos en Cabo Verde son las aguas subterráneas que han sido aprovechadas a través de nacientes, pozos, galerías y sondeos.

El Marco Institucional de la administración de los recursos hídricos en Cabo Verde, en proceso de reforma, disponía como órganos centrales de administración de los recursos hídricos el Consejo Nacional de Aguas (CNAG), el Instituto Nacional de Gestión de Recursos Hídricos (INGRH) y la Agencia Reguladora Económica (ARE). Con la reforma, el INGRH ha pasado a integrarse en la Agencia Nacional de Agua y Saneamiento (ANAS) con competencias más amplias, cuya finalidad es la implementación de las políticas gubernamentales y la gestión integrada de las inversiones en el sector, así como el

planeamiento estratégico, el seguimiento, la regulación técnica, la supervisión y la monitorización de los servicios de producción, distribución y comercialización del agua, recogida, tratamiento y rechazo de efluentes líquidos y residuos en todo el territorio nacional (Boletín Oficial de Cabo Verde, 2013). ARE es una autoridad administrativa independiente cuyo objetivo es la regulación económica de los sectores del agua, energía, transportes colectivos urbanos y marítimos de viajeros.

Hasta el momento de la reforma, la gestión del agua es de competencia municipal, teniendo los municipios la atribución de asegurar el abastecimiento del agua a las comunidades locales (Ley n.143/IV/95). Esa responsabilidad municipal era ejercida por los Servicios Autónomos de Agua y Saneamiento (SAAS) y Empresas municipales, sobre la base de contratos de concesión establecidos con el INGRH. En algunos casos los municipios habían delegado en las comunidades la gestión local del agua. No obstante, en los principales centros urbanos del país la concesionaria de la producción y distribución del agua potable es ELECTRA. Es una sociedad que ostenta la concesión de la producción y la distribución de electricidad en todo el territorio de Cabo Verde, así como la producción y distribución de agua potable en San Vicente, Sal y en Praia (Isla de Santiago), además de la recogida y tratamiento de aguas residuales en la ciudad de Praia. Esta empresa nació como empresa pública del Estado, aunque en 1998 fue privatizada. Desde finales de 2006 está participada de nuevo por el Estado de Cabo Verde y ahora vuelve a estar en proceso de privatización y separación de las áreas de producción, transporte y distribución y tratamiento del agua. Actualmente la reforma del sector pasa también por la transformación de los servicios de distribución de agua en empresas municipales o intermunicipales. En este sentido Santiago, con nueve SAAS, se ha tomado como isla piloto, de forma que la distribución de agua y el saneamiento en la isla pasan a ser competencia de la Empresa Intermunicipal Águas de Santiago (EIAS). La producción de agua queda en manos de otros operadores como ha sido ELECTRA hasta ahora.

Por otra parte, en la última década el Ministerio de Desarrollo Rural ha venido imponiendo una política de construcción de grandes infraestructuras para el aprovechamiento de aguas superficiales para riego agrícola. Entre estas infraestructuras destacó en 2006 la primera presa de Cabo Verde, el Embalse de Poilão, en la Isla de Santiago (este embalse fue llevado a cabo con financiación de la cooperación de la República Popular China). Posteriormente se han construido tres nuevos embalses en Santiago y existen en desarrollo otros nuevos proyectos para Santiago, Santo Antão y Sao Nicolau, todos ellos con créditos del Gobierno de la República de Portugal.

En cuanto a los recursos hídricos industriales es de destacar que actualmente existen instalaciones de producción de agua desalada de mar en prácticamente todas las islas, excepto en Fogo y Brava. Aparte de ELECTRA, Aguas de Ponta Preta (APP) es una empresa que incorpora a socios de capital canario y catalán, se crea en la Isla de Sal para suministro de energía, agua y tratamiento de aguas residuales de un condominio turístico y actualmente ha ido ampliando su actividad a la Isla de Santo Antão, con Aguas de Porto Novo (APN) en asociación con el ayuntamiento del sur de la isla. En la Isla de Boavista opera Água e Energía da Boavista (AEB), participada por ELECTRA y operadores privados. En la Isla de Maio también existen pequeñas desaladoras gestionadas por el SAAS de la Câmara Municipal de Maio para suministro a la población. Otras desaladoras gestionadas por SAAS se ubican en Santa Cruz (Norte de Santiago) y en Ribeira Brava (São Nicolau) con diversos problemas para su puesta en marcha asociados al costo de la energía y la capacidad técnica para su gestión. A todo ello hay que añadir pequeñas instalaciones de desalación privadas asociadas a complejos hoteleros e industrias.

Se considera que en el año 2007, Cabo Verde alcanzó las metas fijadas por los Objetivos del Milenio en cuanto a acceso al agua potable y en 2012 en cuanto a un acceso adecuado

al saneamiento básico (http://mdgs.un.org). En ese proceso son destacables las importantes diferencias entre el medio urbano y rural. En el medio urbano 60,9 % de las agrupaciones familiares tienen acceso a la red pública de distribución de agua y el 31% accede a la red pública de alcantarillado, por otra parte en el medio rural estos indicadores sólo alcanzan el 42,5% y el 1,3% respectivamente (Instituto Nacional de Estadística de Cabo Verde, 2010).

APORTACIONES DESTACADAS DEL PROYECTO ISLHáGUA.

El proyecto ISLHáGUA se estructura en 5 objetivos principales relacionados con 1) el fomento del uso eficiente del agua, la difusión del conocimiento y la prevención de enfermedades de origen hídrico, sobre todo en la población infantil; 2) reforzar las capacidades en el control de la calidad de las aguas; 3) reducir el consumo energético asociado a la desalación y fomentar los sistemas autónomos de desalación con energías renovables; 4) promover la reutilización de las aguas regeneradas y las tecnologías adaptadas y de bajo costo energético para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales; y, por último, 5) seguir consolidando el intercambio de experiencias y cooperación en el sector de los recursos hídricos.

Dentro del primer objetivo de sensibilización para la promoción del uso eficiente del agua, el conocimiento de los recursos hídricos y la prevención de las enfermedades de origen hídrico, se abordó el diseño de una campaña de sensibilización conjunta dirigida al sector de la educación primaria. Esta campaña implicó la creación de material didáctico específico, la elaboración de guiones para talleres didácticos de sensibilización, la formación de dinamizadores para impartición de los talleres y la organización de las actividades para llegar a las aulas (Figura 2).

Dentro de la elaboración de material didáctico es destacable la elaboración de un cómic, a través de la empresa Bla Bla comunicación, que pretendía exponer la realidad de los recursos hídricos en cada archipiélago y fomentar el consumo responsable y seguro del agua entre la población infantil. Este proceso se hizo con historia informativa pero amena y a través de personajes cercanos e identificables por el público objetivo.

Figura 2. Desarrollo talleres ISLHáGUA en Cabo Verde

Los contenidos de los talleres integraban desde reconocer todo el ciclo integral del agua, incluyendo el concepto de acuífero, la desalación de agua de mar y tratamiento de aguas residuales, hasta la calidad de agua para consumo y el fomento del ahorro. La estrategia para llevarlos a cabo contempló la identificación de estudiantes caboverdianos en Canarias para ser formados y que los talleres se pudieran impartir en *crioulo* (lengua materna en Cabo Verde). La empresa canaria Minimoon Eventos se encargó de la teatralización de los talleres y contrató a los dinamizadores finalmente seleccionados para realizar la campaña en Cabo Verde y Canarias. Los talleres de sensibilización en Cabo Verde alcanzaron a 39 colegios de 3 islas y a más de 1.000 miembros de la comunidad escolar. Desde el punto de vista logístico implicó a la Asociación Nacional de Municipios, al Ministerio de Educación y Deportes, así como al Ministerios de Asuntos Exteriores que procuró la financiación. En Canarias se llegó a más de 2.000 escolares de 20 colegios del Sureste de Gran Canaria.

La aceptación de los talleres fue bastante favorable tanto por parte del profesorado como

por el alumnado de las escuelas visitadas, generando motivación, interés y participación activa de la comunidad escolar. Aparte, el éxito de este programa de sensibilización ha tenido como consecuencia que, tanto desde el sector privado como desde las Agencias de Cooperación implicadas en la reforma del sector del agua, se hayan interesado por los talleres y continuado contratando a las empresas canarias involucradas para dar continuidad a las actividades o adaptarlas a las necesidades específicas.

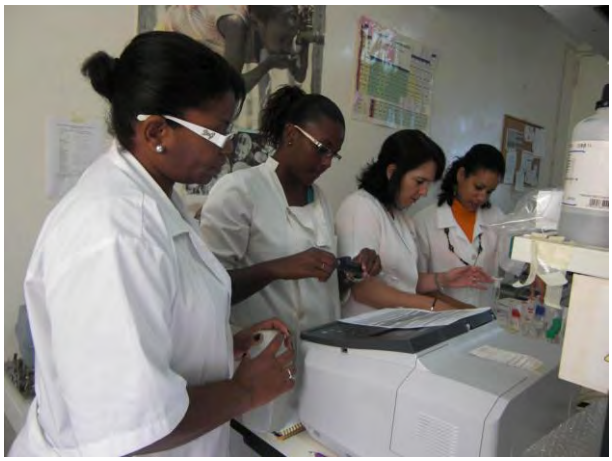


Figura 3. Analistas de ITC y socios de ISLHáGUA en sesiones de trabajo en Cabo Verde.

Dentro del segundo objetivo del proyecto se han reforzado las capacidades en la evaluación y el control de la calidad de aguas potables, marinas, regeneradas y de vertidos. La estrategia llevada a la práctica se centró en varios aspectos relacionados con la disponibilidad de equipamiento analítico, reactivos, material de laboratorio, con la recualificación del personal en técnicas analíticas utilizadas, formación especializada y el fomento de la interrelación y el intercambio de experiencias entre entidades públicas y privadas de Canarias y de Cabo Verde (Figura 3). Se trabajó conjuntamente con los técnicos caboverdianos sobre métodos microbiológicos para la detección de bacterias patógenas en aguas, empleando diferentes medios de cultivo; todos ellos acorde a normas internacionales reconocidas. Una de las actividades contempladas consistió en la participación de laboratorios públicos de Cabo Verde en circuitos de intercomparación de microbiología en aguas potables. Los parámetros intercomparados en este circuito fueron coliformes totales, coliformes fecales, *Escherichia coli*, enterococos, *Clostridium perfringens*, *Pseudomonas aeruginosa*, y gérmenes totales a 22 y 37 ºC analítico de aguas de consumo.

El objetivo de fomentar la especialización y la colaboración público – privada en el sector del control de la calidad de aguas entre Canarias y Cabo Verde, se llevó a la práctica a través de la organización de dos Seminarios Especializados en el Control y Evaluación de las Aguas, con programas adaptados a las circunstancias regionales. La primera jornada se celebró en Gran Canaria en octubre de 2013 y el segundo en Santiago, Cabo Verde, al año siguiente. Las jornadas tuvieron un notable éxito de participación (más de 100 personas se han visto beneficiadas) y con unos óptimos resultados, derivados de las encuestas de satisfacción elaboradas. Como consecuencia de estas jornadas y los intercambios técnicos que se produjeron, se han establecido colaboraciones entre empresas canarias y caboverdianas para el intercambio de conocimientos, suministro equipamiento y material de laboratorio, así como el inicio de envío de muestras a Canarias para su análisis.

Como colofón a toda esta serie de intercambios en el campo de la calidad del agua, y con el objetivo de reforzar aún más dichas capacidades, fue desarrollado un portal web de recursos comunes de laboratorios analíticos de aguas de la Macaronesia (www.redlaboratoriosmacaronesia.org) que pretende ser un punto de intercambio de información y de conocimientos para todos los profesionales relacionados con la calidad del agua. Más de 200 beneficiarios, entre laboratorios y empresas del sector se dan cita en este portal.

La estrategia de promoción de la desalación con eficiencia energética y sistemas autónomos con energías renovables, como tercer objetivo del proyecto, centró sus acciones específicas en el estudio de mejoras en eficiencia energética en plantas desaladoras de

agua de mar con la participación de empresas canarias y de ELECTRA. La metodología seguida para tres instalaciones representativas de todo el sector público de la desalación en Cabo Verde, contempló un amplio programa de medición y toma de datos, documentación y elaboración de fichas técnicas de equipos, evaluación de la eficiencia y consumo específicos, estudio de equipos y elementos clave y análisis de datos. Este trabajo previó dio lugar a la localización de toda una serie de medidas combinadas en diferentes escenarios que fueron analizados desde el punto de vista de su rentabilidad económica. (Tabla I).

Tabla I. Resumen del resultado de las auditorías energéticas realizadas en plantas desaladoras de Cabo Verde

EDAM	Medidas escenarios más rentables	C.E. inicial (kWh/m^3)	C.E. final (kWh/m^3)	TIR	PRI (años)
Palmarejo 5000 m^3/día	Adaptación a Cámara Isobárica	3,87	2,72	28%	4
Palmarejo 1200 m^3/día	Cambio de membranas y de bomba de alta presión	2,96	2,05	22%	5
Matiota 1000 m^3/día	Adaptación a Cámara Isobárica	3,79	2,09	32%	5

La segunda acción se llevó a cabo con la colaboración de la Asociación de Municipios e inicialmente se centró en la identificación de ubicaciones potencialmente favorables para la implantación de sistemas de desalación por ósmosis inversa alimentados por energías renovables de forma autónoma. Finalmente se planteó el diseño del proyecto en la localidad de Espinho Branco, Municipio de Sao Miguel en la Isla de Santiago. Esta localidad destaca por situarse cerca del mar y albergar una comunidad rural conocida como los *Rabelados* que mantiene costumbres tradicionales sin tecnología ni conexión a la electricidad, en viviendas tradicionales de barro, madera y paja y se dedica a la ganadería, pesca y artesanía. El sistema suministraría de agua potable a una población de unos 600 habitantes a un coste inferior al sistema actual basado en el transporte de agua en cubas hasta fuentes públicas. La tecnología a aplicar sería el sistema autónomo de desalación mediante energía solar, basado en la patente DESSOL ®. Precisamente para fomentar el uso de este tipo de tecnologías se emprende una acción formativa con 50 alumnos, en colaboración con la Universidad de Cabo Verde, que plantea un curso básico de desalación con energías renovables, en formato e-learning con los contenidos en portugués y la tutorización desde Canarias.

El cuarto objetivo está centrado en la promoción del tratamiento y regeneración de aguas residuales y su reutilización de forma sostenible. Para este objetivo el trabajo más destacado es el diseño de un Plan Director para posibilitar la reutilización segura de las aguas residuales tratadas en la Ciudad de Praia, la capital del país. Este municipio cuenta con unos 132.000 habitantes y, aunque 65% de la población no dispone de un sistema adecuado de evacuación de efluentes, en el primer trimestre de 2014 la depuradora de la ciudad ya recibía unos 2.500 m^3/día de agua residual, susceptible de tratada y reutilizada. El Plan Director analizó todas las áreas a irrigar en la ciudad y propuso introducir mejoras en la depuradora actual y en la red, implantar un nuevo tratamiento terciario, así como implantar un sistema de regulación y distribución de agua regeneradas con sus correspondientes sistemas de control. Complementaria con a esta acción se abordó el estudio y redacción de un proyecto piloto de depuración descentralizada y de nulo coste energético en algún entorno adecuado de Cabo Verde. Este proyecto finalmente se diseñó para la localidad de Penha de França en el municipio de Ribeira Grande de Santo Antão, concibiendo un sistema en ladera que tratamiento primario anaerobio y varios humedales artificiales de flujo subsuperficial en cascada. Esta actividad ya ha tenido como consecuencia que se desarrolle en Cabo Verde el primer sistema de estas características en la isla de Maio con financiación de la Agencia Española de Cooperación. A su vez esta estrategia también contempla formación a distancia para promover el tratamiento de las aguas residuales a pequeña

escala. Se ha realizado un curso en esta materia de teleformación a finales de 2014 con cerca de 60 alumnos formados de más de 300 solicitudes recibidas.

CONCLUSIONES

El hecho de que el inicio de la cooperación del Gobierno de Canarias con Cabo Verde en materia de gestión de recursos hídricos haya coincidido con el inicio de su reforma del sector de agua y saneamiento, junto con la similitud de la dimensión y cualidad de los problemas a resolver, así como el nivel de desarrollo que aporta Canarias en cuanto a investigación y búsqueda de soluciones, ha dado como resultado que en pocos años Canarias se haya convertido en un referente y socio estratégico para la aplicación práctica de la reforma. Más allá de los proyectos referenciados, numerosas relaciones comerciales y de trabajo conjunto han venido avanzando en los dos últimos años con un protagonismo creciente de las empresas ubicadas en Canarias. Ejemplo de ello es la representación de Canarias, a través del Instituto Tecnológico de Canarias (ITC), en las mesas de Coordinación del Sector del Agua y Saneamiento, así como numerosos proyectos y servicios hechos desde Canarias.

En 2010 se inicia la primera actuación de cooperación pública centrada en el apoyo a la planificación sostenible de los recursos hídricos a través de técnicas participativas y de intercambio de experiencias (PECAVE) y más recientemente, el proyecto ISLHáGUA ha permitido consolidar esta estrategia. En los últimos 3 años de vigencia de este proyecto se han cosechado numerosos resultados gracias a la realización de acciones aparentemente modestas pero que han dado sido realizadas en total coordinación con la estrategia nacional del sector del agua, consiguiendo dar continuidad y utilidad a todos sus resultados en la actualidad.

Gracias a estas actuaciones la presencia de empresas e instituciones canarias de confianza en Cabo Verde se ha consolidado, dando sus frutos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo quieren agradecer a los financiadores de los proyectos PECAVE e ISLHÁGUA, así como a todas las empresas e instituciones que con su colaboración han permitido alcanzar los hitos planteados.

REFERENCIAS

Conselho Nacional da Água – Instituto Nacional de Gestão dos Recursos hídricos (2008). *Plano de Acção e Gestão Integrada dos recursos Hídricos – PAGIRH*, Praia 2008.

Instituto Nacional de Estatística de Cabo Verde, www.ine.cv

Indicadores de los Objetivos de Desarrollo del Milenio. Portal oficial de la ONU para los indicadores de los ODM. http://mdgs.un.org – Consultado 22 de octubre de 2014

LEI N.º 46/VIII/2013 - B.O Nº 48, I SÉRIE, DE 17 DE SETEMBRO DE 2013, República de Cabo Verde

Martel, G. y Peñate, B. (2011). *Apoyo a la planificación de los sectores de la energía y el agua para el desarrollo sostenible de Cabo Verde. Proyecto PECAVE – AGUA*. Dpto. de Agua – ITC. España: 48 – 64.

Peñate, B.; Subiela, V.; Veja, F.; Castellano, F.; Domínguez, F.J. y Millán, V (2014). *Uninterrupted eight-year operation of the autonomous solar photovoltaic reverse osmosis system in Ksar Ghilène (Tunisia)*, Desalination and Water Treatment DOI: 10.1080/19443994.2014.940643: 1-8.

ISBN: 978-84-938046-4-0

APROVECHAMIENTOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN CANARIAS. RETOS DE FUTURO EN CUANTO A LA NORMATIVA DE SEGURIDAD

Ángel MORALES GONZÁLEZ-MORO[1] y Rafael J. LARIO-BÁSCONES[2]

[1,2] Dirección General de Industria y Energía, Consejería de Empleo, Industria y Comercio. Gobierno de Canarias. Avda. Anaga 35, 38001, Santa Cruz de Tenerife. [1]anmorgon@gobiernodecanarias.org, [2]rlarbas@gobiernodecanarias.org

RESUMEN

Los trabajos de investigación y explotación de aguas subterráneas en España en general y en Canarias en particular se rigen por la reglamentación de seguridad minera, sin embargo las singulares características de las explotaciones de aguas subterráneas en Canarias hacen que determinados aspectos de este reglamento sean de muy difícil aplicación directa a las mismas. El Decreto 232/2008, de 25 de noviembre, por el que se regula la seguridad de las personas en las obras e instalaciones hidráulicas subterráneas de Canarias constituye sólo la primera línea de defensa. La elaboración de una normativa propia adaptada a la realidad de las explotaciones canarias, basadas en datos científicos y técnicos actualizados es uno de los grandes retos pendientes que afronta el sector. En este trabajo se exponen las líneas de acción principales sobre las que trabaja el Gobierno de Canarias, orientadas a garantizar la seguridad de los trabajadores, como por ejemplo la aplicación de técnicas modernas de análisis de cables de acero en pozos o el análisis y modelización del comportamiento de la atmósfera de trabajo en las galerías de agua cuya relación con las condiciones atmosféricas no están aún suficientemente estudiadas y caracterizadas.

Palabras clave: *legislación, seguridad minera, pozos, galerías.*

ABSTRACT

The research and exploitation of groundwater in the Canary Islands is regulated by the Spanish Mine Safety Laws, but the uniqueness of Canarian groundwater catchments makes these rules very difficult to be applied in a straight way. The November 25th Canarian Decree 232/2008, focused on safety for not workers, is only the first line of defense in this field. The development of further specific regulation adapted to the reality of the Canary groundwater catchments facilities, based on updated scientific and technical information, is one of the major outstanding challenges this strategic industrial sector is facing. This paper describes the main action lines the Canary Islands Government is adopting, mainly aimed at ensuring the safety of workers, such as the application of modern electromagnetic testing of steel cables used in water wells or the analysis and modeling of the water galleries atmosphere behavior, whose relationship with external atmospheric conditions is known but not yet sufficiently studied and described.

Key words: *regulation, mine safety, wells, galleries.*

INTRODUCCIÓN

En los aprovechamientos de las aguas subterráneas en Canarias se ha prestado mucha atención a la regulación de la protección, caracterización y ritmo de explotación de los acuíferos. Se ha producido en las últimas décadas un gran avance, por ejemplo, en modelización hidrogeológica, con una mayor comprensión de los acuíferos insulares, dando como resultado diversos planes hidrológicos, actualmente en fase de actualización.

Sin embargo este avance en el campo normativo, no se ha dado con igual intensidad en lo referente a la seguridad de los trabajos asociados. En otras palabras, se ha avanzado mucho en la regulación del "qué hacer" y menos en la del "cómo hacerlo".

La elaboración de una normativa propia adaptada la realidad de las explotaciones canarias, basadas en datos científicos y técnicos actualizados es uno de los grandes retos pendientes que afronta el sector del agua en Canarias, cuyo Gobierno autonómico tiene atribuidas las competencias de ejecución reglamentaria y desarrollo normativo.

La necesidad de esta actualización viene marcada no sólo por las singulares características de estas instalaciones, sino sobre todo por su elevado número, tal y como se puede observar a modo indicativo en la Tabla 1 (Dirección General de Industria, 2012)

Tabla 1.- Número de pozos y galerías de agua en las Islas Canarias

	Pozos y sondeos	Galerías
El Hierro	37	12
Fuerteventura	2.720	
Gran Canaria	2.954	413
La Gomera	132	7
Lanzarote	32	8
La Palma	75	162
Tenerife	395	1.111

La tipología de estas explotaciones es muy singular (Figura 1), son excavaciones básicamente lineales y con un solo acceso, lo que ya de por sí constituye toda una excepcionalidad. Las galerías suelen tener menos de 2 m de diámetro y longitudes de hasta 6.600 m y los pozos un diámetro de 3,5 m y profundidades de hasta 600 m. El transporte en las galerías se hace mediante locomotoras diesel sobre vías tipo decauville, no estando electrificadas, y en los pozos mediante cabrestante y transporte en guindola o cuba. La técnica usada en la construcción, ventilación y mantenimiento de estas instalaciones de alto riesgo es puramente minera y la reglamentación nacional que se aplica en ellas es, por tanto, la de Seguridad Minera, aunque es necesario profundizar, y nunca mejor dicho, en este aspecto.

MARCO LEGAL VIGENTE

Legislación estatal

Los trabajos de investigación y explotación de aguas subterráneas en España en general y en Canarias en particular se rigen por el Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera (RGNBSM), aprobado por Real Decreto 863/1985, de 2 de abril, es decir, una normativa que está cerca de cumplir ya 30 años, si bien se ha ido adaptando a las modernas directrices europeas en materia de seguridad laboral, lo cierto es que las

singulares características de las explotaciones de aguas subterráneas en Canarias hacen que determinados aspectos de este reglamento hayan sido siempre de muy difícil aplicación directa a las mismas.

Figura 1.- Imágenes del interior de una galería (izquierda), donde se pueden observar la tubería de conducción de agua y los raíles, y del pórtico de un pozo tradicional canario (derecha) en el que se observa la cuba o "cacharrón" o guindola de acceso al mismo.

El RGNBSM establece en su artículo primero su ámbito de aplicación, mencionando expresamente las explotaciones de aguas subterráneas, siempre que en las mismas se requiera la aplicación de técnica minera.

Ahora bien, no hay definición de "técnica minera" en la legislación estatal salvo la que se ofrece en el artículo 1.4 del Reglamento General para el Régimen de la Minería de 1978 y que sólo se aplicaría al ámbito de aplicación de la Ley de Minas de 1973 cuando los trabajos tienen la finalidad de investigación y aprovechamiento de recursos minerales. Esta definición es muy amplia ya que incluye, por ejemplo, todos los trabajos que se ejecuten mediante labores subterráneas, cualquiera que sea su importancia o los que, hallándose o no comprendidos en los casos anteriores, requieran el empleo de cualquier clase de maquinaria para investigación, extracción, preparación para concentración, depuración o clasificación.

Por otro lado, la Instrucción Técnica Complementaria del RGNBSM, ITC 06.0.07 "Seguridad en la prospección y explotación de aguas subterráneas", indica expresamente que la seguridad de los trabajos y de la maquinaria empleada en cualquier prospección o aprovechamiento de las aguas subterráneas debe ser supervisada por la Autoridad Minera competente, con aprobación previa del correspondiente proyecto.

Así pues, nos encontramos con una definición amplísima y al mismo tiempo restringida al ámbito de aplicación de la Ley de Minas, pero con menciones muy específicas al campo de la seguridad fuera de ese ámbito. Tampoco han contribuido a clarificar esta cuestión, debido al uso generalista del término "industria extractiva", las posteriores transposiciones de Directivas Europeas en materia de Prevención de Riesgos Laborales, tales como el Real Decreto 1389/1997, de 5 de septiembre, por el que se aprueban las disposiciones mínimas destinadas a proteger la seguridad y la salud de los trabajadores en las actividades mineras

y el Real Decreto 150/1996, de 2 de febrero, por el que se modifica el articulo 109 del RGNBSM y se transpone la Directiva 92/91/CEE, de 3 de noviembre, relativa a las disposiciones mínimas destinadas a mejorar la protección en materia de seguridad y de salud de los trabajadores de las industrias extractivas por sondeos. Estamos, por tanto, frente a una posible inconsistencia normativa.

Legislación autonómica

En el año 2008 fue aprobado el Decreto 232/2008, de 25 de noviembre, por el que se regula la seguridad de las personas en las obras e instalaciones hidráulicas subterráneas de Canarias, como primer paso a una regularización de la normativa en materia de seguridad.

Esta normativa está orientada a garantizar la seguridad en las numerosas instalaciones subterráneas creadas por la industria canaria del agua tanto durante su vida útil, como tras su agotamiento, pero fundamentalmente en lo referente a su afección a personas ajenas a la explotación, haciendo especial hincapié en todo lo referente al mantenimiento de los cierres y señalización de las mismas así como en los procedimientos de clausura de instalaciones abandonadas o improductivas.

PROBLEMAS PRIORITARIOS

Introducción

Como puede suponerse son muchos los factores relacionados con la seguridad que es necesario analizar y mejorar, con el objetivo de establecer una normativa más racional y adaptada al estado de las técnicas. Sin embargo hay dos aspectos fundamentales sobre los que es prioritario actuar desde el punto de vista de la prevención de riesgos laborales: las condiciones atmosféricas en el interior de las explotaciones y la revisión y mantenimiento de los cables de acero utilizados para acceder a los pozos.

Atmósfera de interior

En los casos en los que no se dispone de una ventilación artificial en un pozo o galería, la circulación natural de aire viene condicionada por las características del terreno y por las condiciones atmosféricas del exterior. Las variaciones de presión atmosférica, de temperatura y humedad provocan un flujo del aire tendente a equilibrar las condiciones del interior y las externas (Carrasco Galán J, et al 2011), sin embargo la dinámica de este equilibrio es única para cada instalación subterránea ya que la variabilidad de este fenómeno se ve potenciado por la heterogeneidad de los terrenos volcánicos por la alternancia de estratos de diferentes porosidades y por la presencia de zonas de surgencia de gases volcánicos.

Las variaciones de temperatura pueden ser diarias o estacionales (Dirección General de Industria e Interra, Ingeniería y Recursos S.L. - 2011). Por ejemplo el máximo de temperatura diario se produce en torno a las 14 horas solares y el mínimo alrededor de las 6 horas. Cuando la temperatura exterior es superior a la de la obra subterránea, el aire interior tiende a salir de ésta facilitando el ascenso de los gases volcánicos como el CO2. Al contrario, cuando el aire de la obra es más caliente que en el exterior, el aire penetra en el subsuelo bajando la concentración de los gases tóxicos. De igual forma se da esta variación entre el invierno y el verano, siendo en algunos casos imposible trabajar en el interior de algunas galerías en los días más calurosos del año (Figura 2).

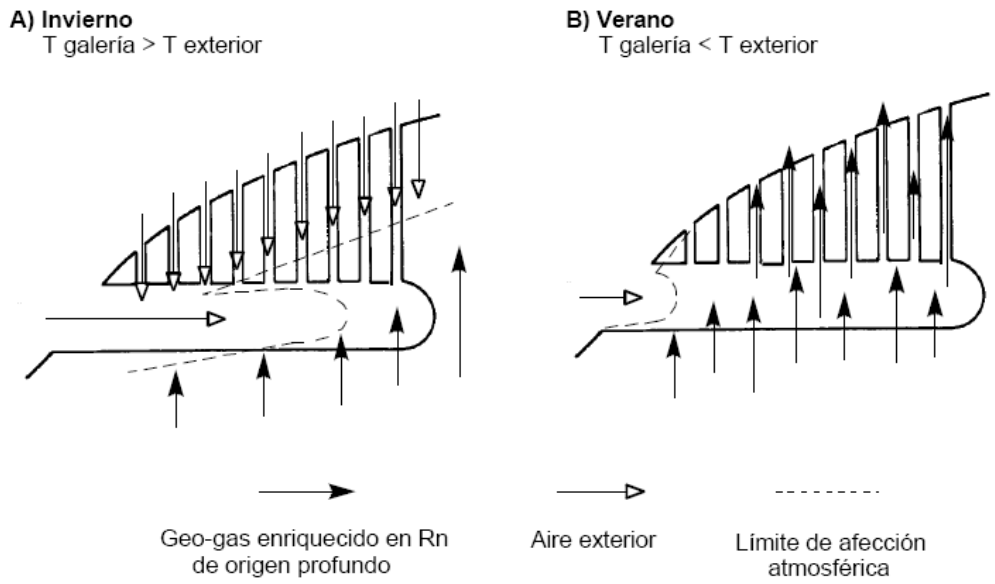


Figura 2.- Efecto de la variación estacional en la ventilación de galerías de agua. Fuente: Dirección General de Industria e Interra, Ingeniería y Recursos S.L. - 2011

El mismo efecto se puede observar con la variación de la presión atmosférica, la marea barométrica diaria, con un ciclo de 12 horas, con mínimos en torno a las 4:00 y 16:00. y máximos a las 10:00 y 22:00 (Horas solares). Sin embargo la influencia de esta variación diaria en las condiciones de trabajo se ve normalmente enmascarada por fenómenos meteorológicos de mayor envergadura.

La influencia de las condiciones atmosféricas en la emisión a través del terreno de gases volcánicos está contrastada en casos similares. Cabe destacar los estudios realizados por el Centro de Vulcanología y Seguridad de Riesgos Geológicos de la Universidad de Las Azores en los volcanes de Furnas y Fogo en la isla de San Miguel (Viveiros F. et al. - 2008) cuyas conclusiones indican que el flujo a través del suelo de CO_2 medido en terrenos volcánicos muestra variaciones muy significativas ligadas a las condiciones meteorológicas, habiéndose detectado picos de surgencia asociados a malas condiciones meteorológicas, con fuertes lluvias y bajas presiones barométricas. Se deja constancia asimismo en dicho estudio de la gran influencia que tienen las características del terreno a la hora de interpretar correctamente las complejas relaciones existentes entre las condiciones atmosféricas y los mecanismos de degasificación natural del terreno.

Aunque los estudios realizados en los volcanes de Furnas y Fogo están más orientados a los mecanismos de degasificación natural, muestran a través una toma sistemática de datos de concentraciones de gases volcánicos y meteorológicos en la misma localización geográfica, poniendo de manifiesto su interrelación; sin embargo, tal y como se expone en su trabajo, las variables meteorológicas que se monitorizaron (temperatura del aire, presión barométrica y precipitación) sólo explicaron entre el 18% y el 50.5% de las variaciones del flujo de CO_2 en las estaciones de medida permanentes instaladas en la Isla de San Miguel; se hace patente, así pues, la necesidad de ampliar el número de variables y de puntos de toma de datos y de establecer las pautas que permitan analizar los mismos en función de las características del terreno.

En el caso de las obras hidráulicas subterráneas, el problema se complica ya que entran en juego muchas más variables al originarse en algunos casos circuitos de ventilación independientes a lo largo de la traza de una galería, por ejemplo, con puntos de surgencia

de CO_2. No se ha estudiado hasta la fecha el comportamiento de la ventilación de una galería de agua mediante la instalación de varios puntos de medida a lo largo de su recorrido para elaborar los modelos predictivos que permitirían establecer protocolos y normas de seguridad adaptados a estas instalaciones. A este respecto es importante hacer una mención especial a los proyectos de cierres de diques que se han venido ejecutando desde hace unos años en algunas galerías canarias con el objeto de crear represas subterráneas reconfinando un determinado acuífero. Es necesario tener en cuenta que al reponer un estrato no poroso que aisla tras de sí un estrato poroso, que es el que conforma el acuífero que se desea regular, se están variando las condiciones de ventilación de toda la galería, pudiendo generarse una situación de riesgo en una instalación que no era peligrosa antes de ejecutar la obra.

De forma complementaria, un estudio de estas características sería de gran utilidad a la hora de estudiar la relación entre las características de los terrenos volcánicos y su degasificación natural, constituyendo la vasta red de infraestructuras subterráneas canarias un laboratorio natural de dimensiones y características únicas a nivel mundial.

Cables de acero en pozos

Otro de los grandes retos en cuanto a adaptación normativa en materia de seguridad lo constituye la adaptación del régimen de inspecciones de cables de acero en los pozos canarios que está actualmente establecido en la Instrucción Técnica Complementaria (ITC) S.M. 04.4.01 del RGNBSM (Orden de 2 de febrero de 1998, del Ministerio de Industria y Energía).

Dicha ITC establece un régimen de revisiones periódico adaptado a las explotaciones mineras con un régimen de uso intensivo en grandes explotaciones y unos requisitos de puesta en servicio acordes con dicho uso. Sin embargo, el uso de la maquinaria de extracción en los pozos tradicionales canarios dista mucho se ser intensivo. Los procedimientos de inspección reglamentarios están orientados a prevenir principalmente el deterioro de los cables desde el punto de vista de su desgaste, rotura de hilos y fatiga material.

Este enfoque es lógico en instalaciones en las que se trabaja en dos o tres turnos diarios con cordadas continuas, elevando sin descanso vagonetas cargadas de material; sin embargo algunos de estos procedimientos resultan de poca utilidad en las labores de mantenimiento puntual de los pozos canarios, como puede ser por ejemplo la sustitución de una bomba o la reposición de un tramo de tubería o de toda su longitud, que puede significar un mes de trabajo, transcurrido el cual lo normal es que no vuelva a utilizarse el cable en meses o incluso años. Así pues, los factores que influyen predominantemente en el deterioro de estos cables son otros, más relacionados con la conservación y el mantenimiento de los mismos y con el diseño de los órganos de amarre y accionamiento que con las solicitaciones mecánicas a que están sometidos. Este extremo ha sido comprobado por el Servicio de Minas del Gobierno de Canarias, que desde el año 2009 ha venido realizando una intensa labor inspectora, llevando a cabo los ensayos electromagnéticos reglamentarios. (Figuras 3 y 4)

CONCLUSIONES

La actualización de la normativa en materia de seguridad minera y su adaptación a las características singulares de las explotaciones de aguas subterráneas en Canarias pasa por el establecimiento de una línea de investigación técnica y científica que puede reportar,

sobre todo en el caso del estudio de la ventilación en las galerías, valiosa información de gran utilidad en el campo de la prevención de riesgos geológicos y vulcanológicos.

Figura 3.- Máquina de ensayo electromagnético situada en el brocal de un pozo tradicional canario (izquierda) y detalle de las grapas de amarre y guardacabos de un cable de acero.

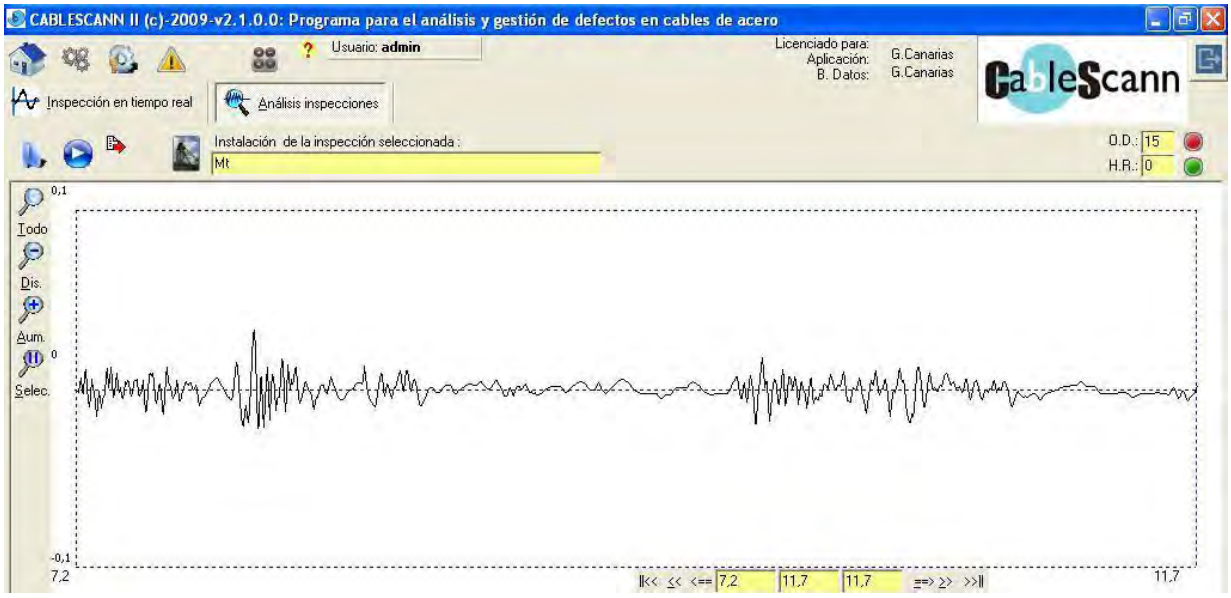


Figura 4.- Lectura de ensayo electromagnético de un cable de acero deteriorado.

Por otra parte, el acceso al interior de las galerías y pozos canarios, para aprovechar su indudable potencial científico está condicionado por el cumplimiento de una serie de medidas de seguridad adaptadas a la realidad de las instalaciones, la imposición de medidas de inspección inadecuadas o superfluas puede originar el desmantelamiento de instalaciones que se hagan económicamente inviables, perdiéndose la información que pudieran llegar a proporcionar.

Como reflexión final, y teniendo en cuenta que en este trabajo se han comentado sólo dos de los múltiples campos en los que es necesario innovar en materia de seguridad, se plantea la colaboración entre la comunidad científica y la administración inspectora en materia de seguridad minera como una herramienta indispensable y de vital importancia para lograr avances en ambos campos.

REFERENCIAS

Carrasco Galán, J. et al. (2011) *Manual de ventilación de minas y obras subterráneas.* AITEMIN. Madrid 438 pp .

Dirección General de Industria e Interra, Ingeniería y Recursos S.L. (2011) *Manual técnico para la ejecución de galerías.* Consejería de Empleo Industria y Comercio. Gobierno de Canarias. 135 pp.

Dirección General de Industria e Interra, Ingeniería y Recursos S.L. (2012) *Manual técnico para la ejecución de pozos.* Consejería de Empleo Industria y Comercio. Gobierno de Canarias. 191 pp.

Lario-Báscones, R.J. y Santamarta Cerezal, J.C. (2013) *Análisis de la seguridad minera en las explotaciones subterráneas tradicionales de Canarias.* Ingeoprés - ISSN 1136-4785 pp. 34-43.

Orden de 2 de febrero de 1998, por la que se modifica la ITC 04.4.01 “Labores subterráneas. Cables” aprobada por Orden de 13 de septiembre de 1985. Ministerio de Industria y Energía BOE de 14 de febrero de 1998.

Real Decreto 863/1985, de 2 de abril, por el que se aprueba el Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera. BOE de 12 de Junio de 1985.

Viveiros F. et al. (2008) *Environmental influences on soil CO2 degassing at Furnas and Fogo volcanoes (São Miguel Island, Azores archipelago).* Journal of Volcanology and Geothermal Research 177, p 883–893.

ISBN: 978-84-938046-4-0

BALANCE HÍDRICO EN EL PLAN HIDROLÓGICO DE GRAN CANARIA

Enrique José MORENO DEUS[1]

[1]Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria. enrique.moreno@aguasgrancanaria.com

RESUMEN

Siguiendo el mandato de la Directiva Marco del Agua 2000/60/CE en la Demarcación Hidrográfica de Gran Canaria se ha desarrollado el Plan Hidrológico 2009-2015, que se tramita como Plan Territorial y está pendiente de aprobación. En el presente artículo se explica el balance hídrico de dicho plan, se discuten sus datos de partida y las posibles conclusiones que alumbra con el objeto de mejorar la comprensión del ciclo hidrológico, valorar la fiabilidad de los resultados y apuntar las líneas de trabajo futuras para mejorar el conocimiento y la gobernanza de los recursos hídricos en la isla.

Palabras clave: *planificación, balance hidrológico, recursos, usos.*

ABSTRACT

Following the mandate of the Water Framework Directive 2000/60/CE on the River Basin of Gran Canaria has been developed the Hydrological Plan 2009-2015, which is processed as Territorial Plan and is pending approval. In this paper the water balance of the Hydrological Plan is explained, its input data and the possible conclusions are discussed in order to improve understanding of the hydrological cycle, assess the reliability of the results and point the lines of future work, improving knowledge and governance of water resources on the island.

Key words: Planning, hydrological balance, resource, uses.

INTRODUCCIÓN

La escasez de recursos hídricos ha constituido históricamente para Gran Canaria un factor limitante para el desarrollo de sus actividades económicas y por supuesto también lo es en la actualidad, aunque en menor medida, pues los desarrollos tecnológicos y las recientes etapas de planificación han supuesto un avance muy significativo en la protección del acuífero y la garantía de abastecimiento de agua.

El balance hídrico constituye la esquematización de una realidad compleja y su coherencia radica en la inclusión de los detalles sin perder la perspectiva global. El balance debe explicar bien los flujos de agua, las entradas y salidas así como las necesarias transformaciones del agua en su recorrido.

En éste artículo se aborda el balance hídrico insular y como antecedentes en cuanto al

conocimiento de la hidrogeología y los balances insulares cabe destacar el Estudio General de la Demarcación Hidrográfica de Gran Canaria (CIAGC, 2009), los proyectos Canarias SPA-15 (1975), MAC-21 (Sin publicar, 1980), el Plan Hidrológico de 1999 (CIAGC, 1999), los diversos trabajos del grupo de hidrogeología de la ULPGC (recopilados en Cabrera y Custodio, 2010) y los estudios de hidrogeología de las zonas Este y Norte (IGME-CIAGC, 2005; 2009).

CONSTRUCCIÓN DEL BALANCE HÍDRICO DE GRAN CANARIA

La síntesis del balance hídrico insular para la isla de Gran Canaria se explica para el año 2007, se incorporan los datos desde 1972 y se realizan las proyecciones a los diferentes horizontes del Plan Hidrológico, que corresponden a los años 2015, 2021 y 2027.

Por su condición insular solo existen dos aportaciones significativas de agua al sistema: la lluvia y el agua de mar. Respecto a las salidas, los usos del agua no suponen necesariamente una eliminación del recurso, ya que el agua permanece en el sistema hasta que sale por evapotranspiración a la atmósfera o por vertidos y escorrentías al mar. La diferencia entre entradas y salidas al sistema insular es, por lo tanto, la variación de los recursos almacenados, principalmente en el acuífero y en menor medida reservas de embalses. Los usos del agua considerados son el agrícola, urbano, turístico industrial y recreativo.

LOS RECURSOS HÍDRICOS

Los datos que se presentan en la figura 1 corresponden al año 2007, en el que para satisfacer una demanda de 167 hm3 se usan 71,4 hm^3 de agua subterránea (42,8%), 72,8 hm^3 de desalada de mar (43,6%), 11,8 hm^3 de regenerada (7,1%) y 11,0 hm^3 de superficial (6,6%). Los recursos hídricos utilizados presentan un alto grado de incertidumbre, pues no existen datos fehacientes acerca de producciones y aprovechamientos de agua.

En el año 2007 se estima que se aprovechan 71,4 hm^3 de agua subterránea, de los que se usan directamente unos 64,5 hm^3 y 6,9 hm^3 proceden de la desalinización de agua salobre. Puesto que no se dispone de datos de producción anual de las plantas desalinizadoras de agua salobre, los cálculos se han basado en la capacidad instalada, que es de 31,6 hm^3, y el coeficiente de utilización. Es necesario mejorar la cuantificación de la extracción de agua subterránea pues no se tiene un conocimiento preciso del volumen de agua aprovechado en la isla.

En la elaboración del balance se han utilizado datos de lluvia de la red de pluviómetros del Consejo Insular de Aguas, con valores reales para los años pasados y el valor medio de la del histórico de los registros pluviométricos para los balances futuros. En los últimos años la contribución al balance hídrico del agua desalada permitido alcanzar una explotación del acuífero próxima al equilibro entre entradas y salidas, en el que la pluviometría anual constituye un condicionante fundamental para que las reservas de agua subterránea aumenten o disminuyan según el año sea más o menos húmedo.

Las aguas superficiales se aprovechan mediante numerosas infraestructuras, como de tomaderos, presas, balsas, estanques sobre los cuales se mantiene en el balance el valor constante 11 hm^3 anuales que se había fijado en el anterior ciclo de planificación hidrológica. Si bien es cierto que su volumen depende de la pluviometría anual, su contribución al balance hídrico es pequeña y con frecuencia su regulación es hiperanual para el caso de las presas, las estimaciones serían más precisas si se dispusiese de datos reales de

explotación.

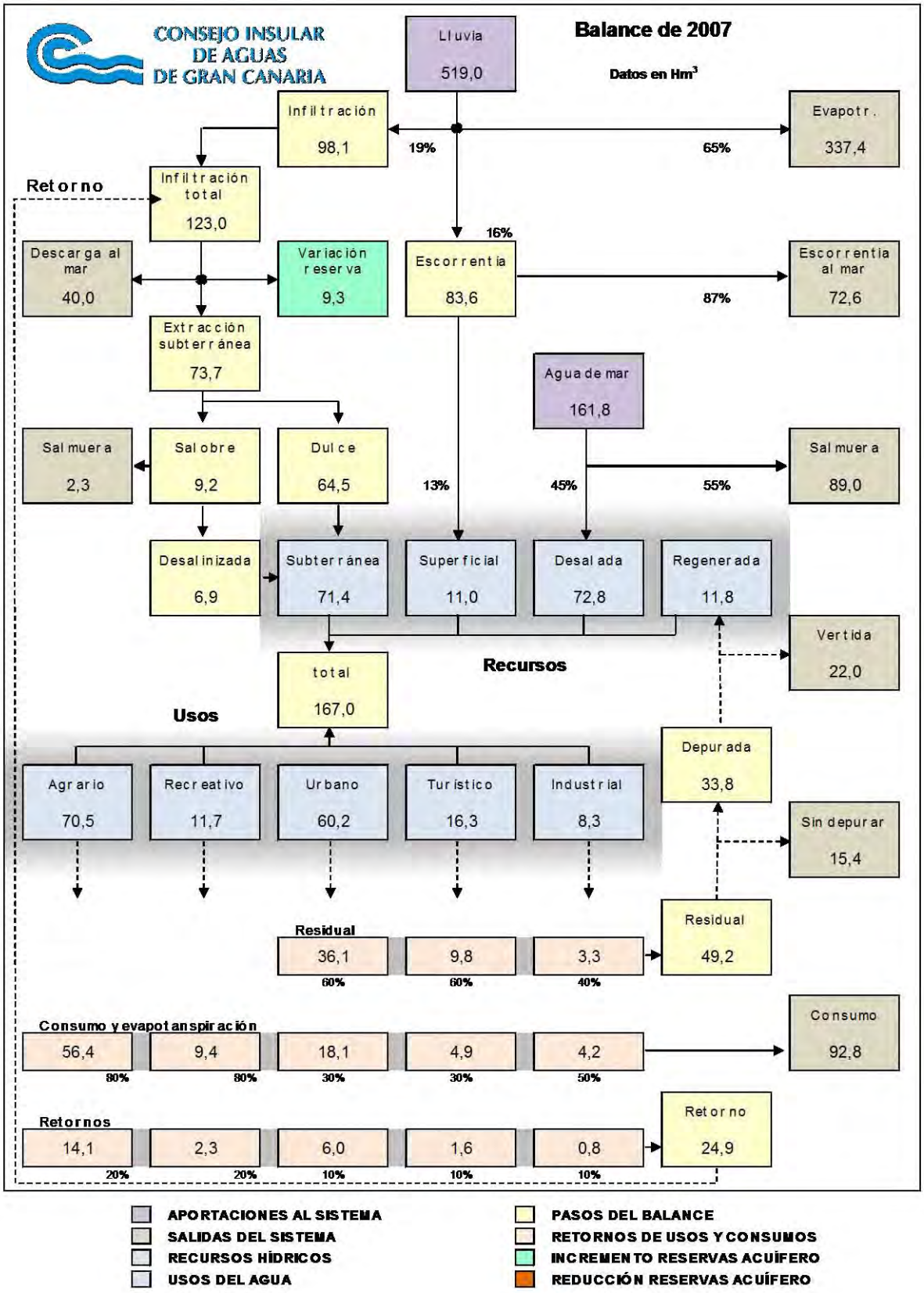


Figura 1. Balance para el año 2007, datos en hm^3. La demanda satisfecha es de 167 hm^3

Los parámetros de infiltración, escorrentía superficial, descarga subterránea y evapotranspiración adoptados son los del Plan Hidrológico de 1999, basados en los cálculos del SPA-15 (1975). Las próximas revisiones del balance deberán profundizar en el ajuste de estos valores para mejorar el grado de conocimiento de los recursos hídricos insulares y garantizar una explotación sostenible del acuífero insular.

Mediante desalación de agua de mar se aportaron 72,8 hm^3 en el año 2007 de los que se conoce bien la capacidad instalada y en menor medida las producciones reales y los usos a los que se destina, ya que la producción presenta variaciones condicionadas por la disponibilidad de recursos hídricos naturales.

Las aguas regeneradas contribuyeron al balance en el año 2007 con 11,8 hm^3, apenas un 14% del total del abastecimiento urbano y turístico. El volumen producido se conoce y satisface parte de la demanda agrícola y los usos recreativos. El agua regenerada es un recurso no convencional cuya contribución debe ser más relevante en el fuFiguraturo y para ello es preciso conocer bien el flujo de las aguas residuales, que es el que se indica en la figura 2, como herramienta para seleccionar las medidas para incrementar la producción de aguas regeneradas y para la reducción de la contaminación, pues se vierten al mar 14,4 hm^3 de agua sin depurar y 22 hm^3 de agua depurada.

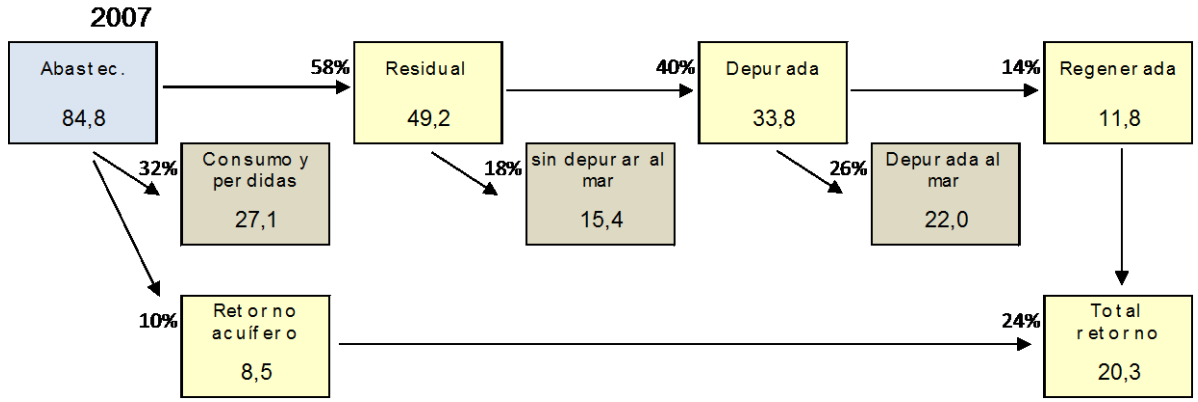


Figura 2. Depuración y regeneración de las aguas en el año 2007, datos en hm^3.

Los retornos al acuífero son de 24,9 hm^3 para el año 2007 y se han calculado a partir de los diferentes usos, con coeficientes de retorno al acuífero del 20% para los usos agrícola y recreativo y del 10% para los usos urbano, turístico e industrial.

USOS DEL AGUA

La demanda se divide en cinco apartados, que en el año 2007 se reparten en 70,5 hm^3 (42,2%) de demanda agraria, 11,7 hm^3 (7%) para usos recreativos (jardinería y golf), 60,2 hm^3 (36%) para uso urbano, 16,3 hm^3 (9,8%) turístico y 8,3 hm^3 (5%) industrial. Las demandas consideradas son brutas e incorporan todas las pérdidas derivadas del transporte, almacenamiento, y distribución del recurso.

Las demandas urbana y turística se han calculado con los datos suministrados por los diferentes servicios de abastecimiento municipales. La demanda turística se ha segregado de la urbana a partir del análisis de los patrones de consumo de los municipios no turísticos

en comparación con los turísticos y los datos de ocupación turística ofrecidos por el ISTAC. El volumen depurado se ha calculado mediante el volumen tratado y la carga contaminante en todas las depuradoras de la isla.

La demanda agrícola se ha calculado a partir del mapa de cultivos del año 2005 de la Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación con las dotaciones propuestas en el Plan Hidrológico de 1999.

Como demanda industrial solo se ha considerado aquella que no está integrada en los servicios de abastecimiento municipales, de modo que parte de la demanda industrial queda integrada en la demanda urbana. El volumen de la demanda industrial con abastecimiento independiente no es un dato conocido y por lo tanto se ha mantenido la demanda considerada en el Plan Hidrológico de 1999.

EVOLUCIÓN DEL BALANCE

En la situación de partida del Plan Hidrológico 2009-15, que se fijó en el año 2007, la demanda total era de unos 167 hm^3 y se abastece principalmente con aguas desaladas de mar y con aguas subterráneas, correspondiendo el resto a partes iguales a las aguas superficiales y las regeneradas. El escenario previsto para el 2015 contempla una demanda total de 178,9 hm^3, lo que suponía un crecimiento anual del 0,86% entre ambos períodos.

Se ha realizado un balance hídrico insular para cada año desde 1972. Los datos de las demandas y recursos explotados de los años intermedios se han obtenido de los diversos balances puntuales que se han conseguido principalmente de estudios de abastecimiento y saneamiento, en su mayoría no publicados. Para los años sin datos se han interpolado linealmente.

En general, el modelo de simulación utilizado evidencia un descenso generalizado de la las reservas del acuífero desde 1972, y una relativa estabilización en los últimos años, aunque con una acusada volatilidad en función de la pluviometría anual. La explotación racional de los recursos hídricos y una disminución de la extracción del acuífero han permitido estabilizar o recuperar niveles, aunque en ocasiones también puede ser motivado por un descenso de la calidad del agua o de la productividad de los pozos.

La única evaluación de las reservas de agua subterránea se realizó durante el SPA-15 (1.971-1.973) y ascendió a 2.125 hm^3. Esta cifra se calculó estimando una determinada capacidad de almacenamiento de agua a cada clase de terreno y asignándolo al volumen de terreno con agua. En el modelo se ha recogido la evolución desde el SPA-15 con las hipótesis de reserva inicial y parámetros del balance hidrológico que proponía el propio SPA-15, así como la evolución real de los usos del agua y recursos alternativos durante estos años.

Si bien es cierto que existen muchos grados de incertidumbre sobre los parámetros que conforman esta curva, podemos afirmar que el comportamiento de la productividad del acuífero y los niveles de explotación de los pozos son acordes con esta tendencia.

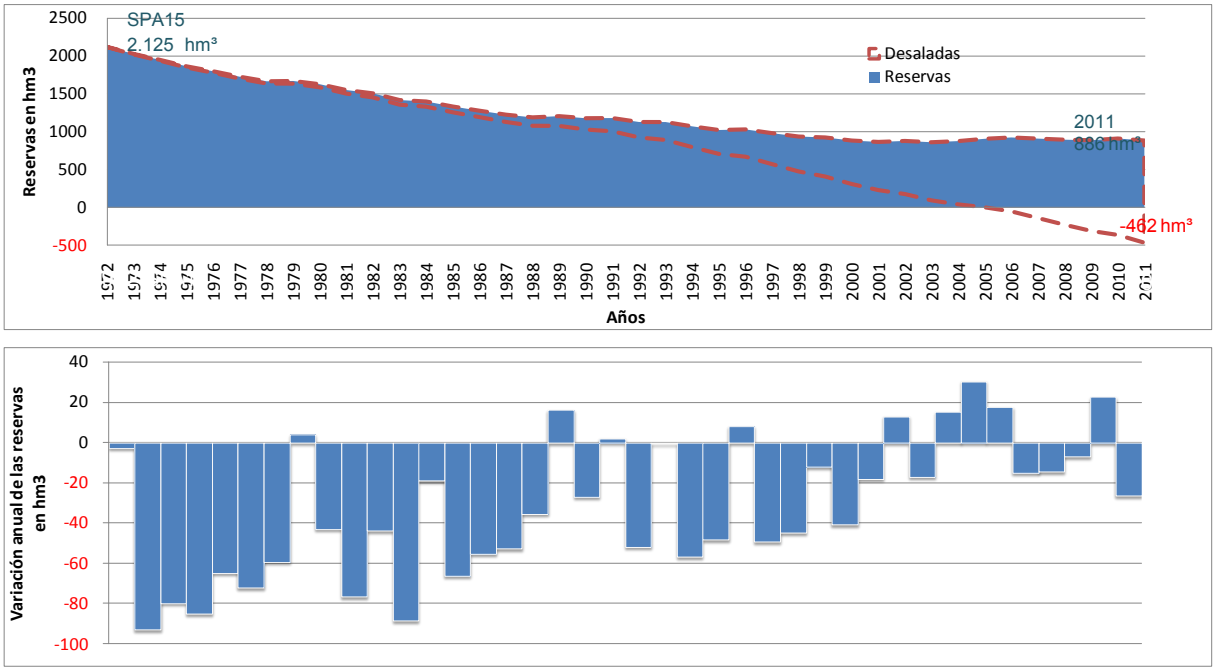


Figura 3. Balance anual del acuífero 1972-2011. En la parte superior se refleja en azul la curva de variación de las reservas partiendo de la situación inicial fijada por el SPA15 y en trazo discontinuo la evolución de esa reserva teórica sin la contribución de la desalación, en la que las reservas se habrían agotado en el año 2005. En la parte inferior se refleja el balance anual de las reservas en hm^3.

La prognosis hasta los años 2015 y 2027 se basa principalmente en un crecimiento moderado de la demanda (Figura 4), un incremento moderado de la desalación y un gran desarrollo de las aguas regeneradas (Figura 5) que permiten una leve recuperación de las reservas del acuífero, en la consideración de que las aportaciones pluviométricas medias de los próximos años presente un valor inferior a la media de la serie histórica en un 10%. Este criterio se ha acordado como un resguardo más del modelo frente a las grandes incertidumbres que presentan sus datos de base.

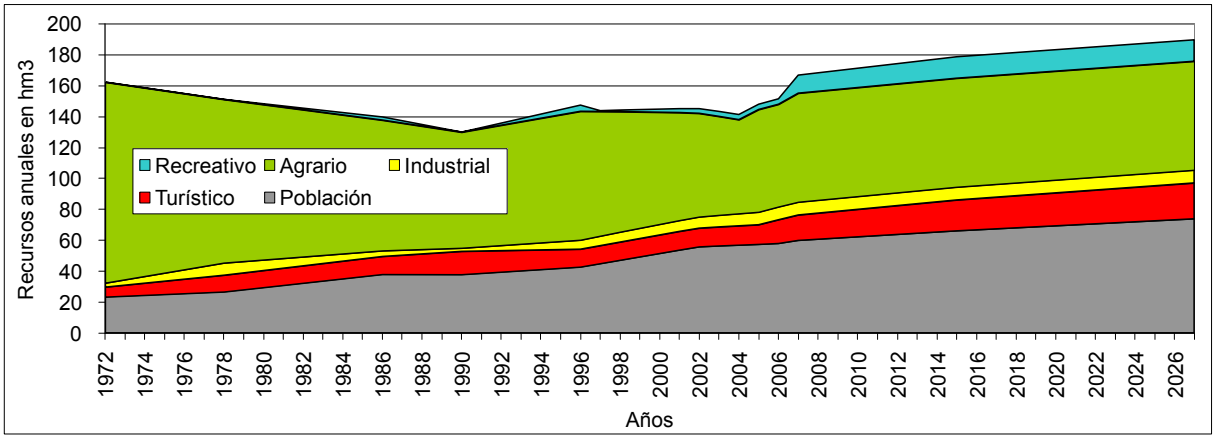


Figura 4. Evolución anual de los usos del agua hasta 2027, datos en hm^3.

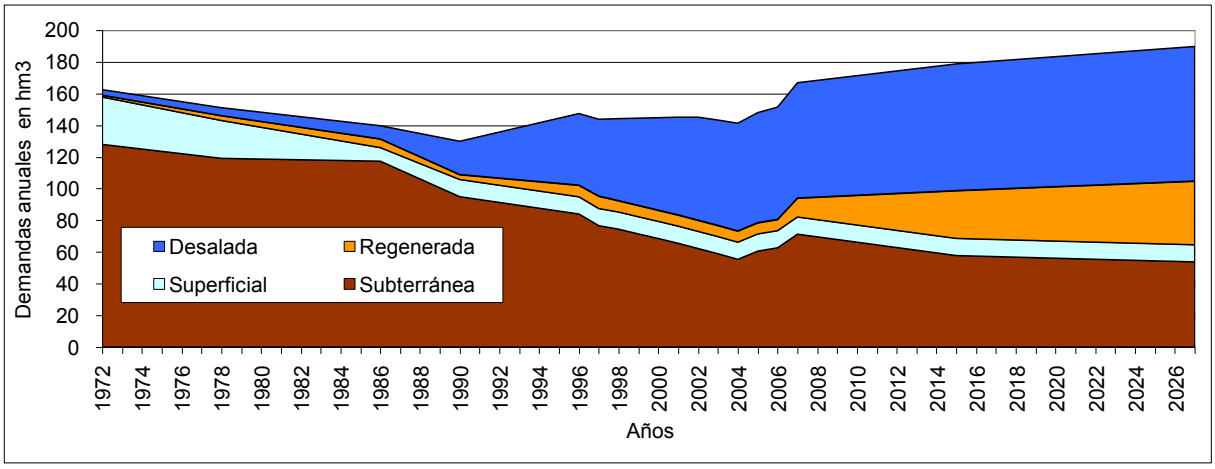


Figura 5. Evolución anual de los recursos hídricos hasta 2027, datos en hm^3.

EL BALANCE ENERGÉTICO

La importancia del agua desalada en el contexto de Gran Canaria hace que hoy más que nunca el déficit hídrico se haya transformado en un déficit energético, pues la realidad es que, con la energía suficiente, podríamos disponer de toda el agua necesaria. Por ello en el Plan Hidrológico 2009-15 se incluye un balance energético que se puede representar en el mismo formato que el hidrológico pero que se muestra en forma resumida en la tabla 1.

Tabla 1. Balance energético del ciclo del agua insular.

Balance energía 2007 GWh	Agrario	Recr.	Urbano	Turist.	Industr.	Total
Producción	80,6	17,5	219,6	60,0	25,5	403,2
Subterránea dulce	13,2	0,0	4,5	1,2	1,0	19,9
Subterranea salobre	9,0	3,4				12,4
Desalada	53,9	4,4	215,1	58,8	24,5	356,7
Regenerada	4,6	9,6				14,2
Distribución	51,2	4,2	32,8	5,9	3,0	97,1
Saneamiento			30,7	8,3	4,2	43,2
Alcantarillado			1,9	0,5	0,3	2,7
Depuración			28,8	7,8	4,0	40,6
Total	131,8	21,7	283,1	74,2	32,8	543,5

Los 544 Gwh suponen el 14,4% del total del consumo energético de la isla en el año 2006, que fue de 3.780 Gwh (Estadísticas Energéticas de Canarias, 2006), lo cual refleja la relevancia del sector del agua en el mercado energético.

CONCLUSIONES

El balance hídrico es una herramienta básica para el plan hidrológico cuya precisión está

basada en la calidad de los datos que lo sustentan y en las interpretaciones que se realizan sobre los parámetros menos conocidos. Es necesario mejorar la disponibilidad y precisión de los datos que evite en lo posible realizar estimaciones sobre parámetros que pueden ser medidos, pues unos buenos datos de partida permitirán la revisión del modelo y su ajuste a la situación actual.

La eficacia de las medidas a adoptar para la protección de las aguas y el uso racional de los recursos hídricos dependen en gran medida de la fiabilidad del balance hídrico. El análisis de los resultados indica que las políticas de desalación y de ordenación de los recursos hídricos aplicadas en los últimos años han tenido consecuencias positivas en la protección del acuífero y que en los próximos años podría lograrse una cierta recuperación.

El análisis de la metodología y conclusiones del balance hídrico de Gran Canaria sugiere, por tanto, varias áreas donde es preciso profundizar en el conocimiento, particularmente respecto al ciclo natural de las aguas. Dicho balance hídrico debe ser el punto de partida de nuevos trabajos que permitan conocer mejor el funcionamiento de los sistemas de abastecimiento insulares, del ciclo hidrológico y particularmente del acuífero, integrando los modelos hidrogeológicos existentes y completándolos.

Ante la próxima revisión del Plan Hidrológico 2015-21 es el momento de actualizar estos balances, fijar los nuevos objetivos y previsiones para los años 2021 y 2027, evaluar las medidas del Plan Hidrológico del 2009 y determinar las políticas hidráulicas del nuevo plan encaminadas a conseguir la calidad de las aguas y la satisfacción de la demanda con un uso racional.

REFERENCIAS

Cabrera. M.C. y Custodio, E. (2010). *La investigación hidrogeológica en Canarias desde el Proyecto Canarias SPA-15.* En M.C. Cabrera, J. Jiménez y E. Custodio (eds.): El conocimiento de los recursos hídricos en Canarias cuatro décadas después del proyecto SPA-15. Ed. Asociación Internacional de Hidrogeólogos-Grupo Español, 109-116.

Consejería de Empleo, Industria y Comercio (2006) *Estadísticas Energéticas de Canarias 2006* http://www.gobiernodecanarias.org/cicnt/doc/industriayenergia/publicaciones/Anuario2006.pdf

Cruz-Fuentes, T.; Benavides, A.; Hernández, P.; Cabrera, M.C.; Estévez, E. y Custodio, E. (2012). *Estimación de la recarga natural en la zona noreste del acuífero insular de Gran Canaria (Islas Canarias, España) mediante el balance de cloruros atmosféricos.* En L.J. Lambán; T. Carceller; M. Valverde y C. Fernández-Jaúregui (eds.): Congreso Ibérico Aguas subterráneas: desafíos de la gestión para el siglo XXI. Ed. Asociación Internacional de Hidrogeólogos-Grupo Español.

CIAGC (Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria) (1999). *Plan Hidrológico de Gran Canaria.* Boletín Oficial de Canarias 73, 8/6/1999. Decreto 82/1999

CIAGC (Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria). 2009. *Estudio General de la Demarcación Hidrográfica de Gran Canaria.* http://www.aguasgrancanaria.com

IGME- CIAGC (2005) "*Estudio hidrogeológico para la definición de áreas sobreexplotadas o en riesgo de sobreexplotación en la zona baja de Gran Canaria."* (Documento interno)

IGME- CIAGC (2009) "*Estudio hidrogeológico de la zona Norte de Gran Canaria."*(Documento interno)

SPA-15, (1975). *Estudio científico de los recursos de agua de las Islas Canarias* (D. Fernandopullé, S.Sáenz–Oiza, R. Heras, A. Sahuquillo, E. Custodio, eds. UNESCO–DG Obras Hidráulicas. Las Palmas de Gran Canaria/Madrid. 4 Vols

ISBN: 978-84-938046-4-0

INFLUENCIA DE LAS DECISIONES POLÍTICAS EN LA RENTABILIDAD DEL RIEGO DE ESPECIES FORRAJERAS CON AGUAS REGENERADAS

María del Pino PALACIOS-DÍAZ[1], Vanessa MENDOZA-GRIMÓN[1] y Alberto DEL VILLAR GARCÍA[2]

[1] Departamento de Patología Animal, Producción Animal y Ciencia y Tecnología de los Alimentos, Gpo investigación GEOVOL. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 35413 Las Palmas de Gran Canaria, España, mp.palaciosdiaz@ulpgc.es
[2] Departamento de Economía y Dirección de Empresas, Universidad de Alcalá, 28802 Alcalá de Henares, España, alberto.delvillar@uah.es

RESUMEN

La escasa disponibilidad de agua a bajo precio y el actual régimen de ayudas del Régimen Especial de Abastecimiento (REA), ambos decididos a nivel político, explican que el autoabastecimiento forrajero sea actualmente un objetivo inalcanzable en Canarias. El Plan de Forrajeras de Canarias pretende contrarrestar esta realidad e incrementar su nivel de autoabastecimiento. La ayuda financiera que supone el REA reduce el importe a pagar por el forraje importado (83.000t anuales) frente al producto local, condicionando la adopción de decisiones por parte de los ganaderos. De acuerdo a los cálculos realizados, reutilizando el agua en lugar de verterla, el cultivo de Maralfalfa podría ser competitivo frente a la importación, siendo financieramente viable con precios del agua en un rango de 0,20-0,30 €/m^3 (precios perfectamente asumibles para aguas regeneradas con bajo nivel de tratamiento, pero cumpliendo exigencias del RD 1620/2007 de reutilización). La aportación económica de estos cultivos podría representar la creación de unos 640 nuevos puestos de trabajo, la puesta en valor de tierras actualmente abandonadas, además de un incremento del Producto Interior Bruto (PIB) del archipiélago en algo más de 23 millones de euros, producto de la sustitución de importaciones por producción local. Considerando, asimismo, un ahorro de las ayudas del REA para la importación (6 millones de euros).

Palabras clave: *Islas Canarias, maralfalfa, agua reutilizada, Régimen Especial de Abastecimiento (REA).*

ABSTRACT

The limited availability of water at a low price and the current scheme for specific supply arrangements (REA), decided at the political level, explain that the forage self-sufficiency is currently unachievable in the Canaries. Forage Plan of Canarias (PFORCa) aims to counteract this situation and increase their level of self-sufficiency. The financial help received by REA reduces the amount payable for the imported (83,000 tonnes annually) compared to local forage production, conditioning the adoption of decisions by farmers.
According to calculations performed, reusing water instead of discharging, the cultivation of maralfalfa could be competitive against imports, being financially sustainable with water prices in a range of 0.20-0.30 €/m^3 (prices assumable for reclaimed water with low level of treatment). The economic contribution of these crops could represent 640 new jobs, the enhancement of currently unexploited land, plus an increase in Gross Domestic Product (GDP) the islands at just over € 23 million, result of import substitution by domestic

production. Whereas also helps save the REA's aid (€ 6 million).

Key words: *Canary Islands, maralfalfa, recyclable water, Régimen Especial de Abastecimiento (REA).*

INTRODUCCIÓN

Los objetivos que persigue una política económica que intervenga en los mercados son de tres órdenes: Eficacia productiva, incentivando el crecimiento económico y la mejor asignación de recursos; Equidad distributiva, reduciendo el nivel de desigualdad de una sociedad; y Estabilidad, permitiendo una adaptación sostenible a los ciclos económicos y manteniendo controlado el crecimiento de los precios.

El actual marco regulador del Régimen Especial de Abastecimiento (REA) persigue (o al menos así debería) estos objetivos. De una parte, no menoscabar la capacidad productiva de determinados agentes que precisan de inputs productivos de difícil acceso, o en condiciones económicas muy desfavorables, dada la condición ultraperiférica del Archipiélago Canario (Eficacia). También persigue abaratar la cesta de la compra de los consumidores ultraperiféricos canarios (Equidad). Y mantener el nivel de precios de los productos ofrecidos en el mercado canario (Estabilidad). Sin embargo, ninguna intervención es neutral. Cuando se protege económicamente a un sector se desprotege automáticamente otro, alterando sus condiciones de producción y rentabilidad. Este es el caso del sector forrajero, desprotegido en Canarias por efecto de la existencia de ayudas al sector ganadero en términos de subvenciones a la importación de forrajes. Los efectos de esta política son reducidos en su dimensión económica (las ayudas a todo el sector apenas alcanzan los 6 millones de €), pero son muy representativos por los efectos que conllevan. En este trabajo se propone dar a conocer los grandes efectos de pequeñas políticas económicas, explicando cómo se puede dar lugar a desaprovechar recursos y factores productivos, pretendiendo justamente lo contrario.

Analizamos, en primer lugar, las cifras a nivel de explotación de un cultivo forrajero de alto potencial productivo, la maralfalfa (Marquez et al, 2007 y Palacios et al, 2013), que puede adaptarse perfectamente a algunas zonas de las Islas. Superado ese nivel microeconómico, las grandes cifras macroeconómicas que se esconden detrás nos revelarán los posibles efectos sobre el Producto Interior Bruto y el empleo, cuestión que abordamos en segundo término.

EL CULTIVO DE MARALFALFA EN LAS ISLAS CANARIAS PRODUCCIÓN INTERIOR FRENTE A LA IMPORTACIÓN. ASPECTOS ECONÓMICOS

En este apartado abordaremos las cifras que aporta el actual Régimen Especial de Abastecimiento de Canarias (REA) en relación a la importación de forrajes para suministro a actividades ganaderas, comparándolo con la posibilidad de sustituir su importación por producción interna. La pretensión de este apartado no es formular la teoría económica general acerca del modelo de industrialización por sustitución de importaciones (conocido por sus siglas ISI), sino la de aportar los rasgos básicos que definen las prácticas que llevan a implantar una política de incentivos de cara a proteger a un sector económico de la competencia exterior, y su relación con el cultivo de forrajes en las Islas Canarias.

La política de sustitución de importaciones: Ventajas e inconvenientes

Toda medida proteccionista, al igual que una moneda, presenta dos lados. Una cara, que

favorece a determinados actores económicos (ya sean productores, importadores o consumidores) beneficiarios de la medida. Y una cruz, que lastra a determinados sectores de la economía en forma de mayores costes (incluso de oportunidad) o restricciones de competencia.

Las medidas proteccionistas tienen una justificación en la adecuación de las condiciones de determinados sectores frente a la competencia exterior. La aplicación de éstas supone un reconocimiento de la debilidad o inferioridad de condiciones de un sector de cara a competir en igualdad de condiciones en un mercado abierto. Esta inferioridad puede estar motivada por múltiples factores, tanto de índole económica como política. Un ejemplo de la aplicación de estas medidas proteccionistas, como hemos señalado en apartados anteriores, es el REA. En su raíz, el REA se configura como un *instrumento esencial para el desarrollo de las producciones agrícolas locales y el suministro de productos agrícolas*. Esto permite incorporar factores productivos a las explotaciones agrícolas y ganaderas en situaciones preferentes en aras de suplir las desventajas motivadas por la situación ultraperiférica del archipiélago. En el particular caso que nos ocupa, tratamos la ayuda financiera que se aporta a la importación de forrajes procedentes de otras regiones de la UE. La aplicación de las citadas ayudas permite *rebajar* el coste de producción en el sector ganadero, compensando el coste de transporte desde el origen de productos forrajeros. Supone un menor coste de este factor productivo que incide en el precio final y la capacidad de producción. Esta medida ha llevado a una intensificación progresiva de las producciones ganaderas, sobre todo en las islas más áridas. Estas explotaciones se han ido desvinculando progresivamente de los terrenos que las rodean, lo que se asocia a un incremento de los riesgos ambientales. Además, bajo nuestro punto de vista, esta política trae como consecuencia una ineficiente asignación de recursos internos motivada por un coste ficticio de un factor productivo, a la par que una pérdida de producción económica, que aquí nos atreveremos a cuantificar y comparar.

Una sustitución parcial de las importaciones de estos productos podría tener consecuencias positivas en el ámbito económico interno de la región canaria. Siendo exhaustivos en su enumeración, señalamos como grupos de ventajas el ahorro en los pagos exteriores (importaciones), el incremento de la producción interior (incremento del PIB), utilización de factores productivos en desuso (recursos hídricos no convencionales actualmente vertidos, tierras abandonadas, trabajo, capital, etc.), ahorro de recursos financieros públicos (pagos directos de las AAPP derivados de la aplicación del REA y mejora en la recaudación fiscal por la actividad económica) y mejoras ambientales. En esta línea de pensamiento se está diseñando el Plan Forrajero de Canarias 2014/2020 (PFORCA, 2014), que menciona en su introducción: "*precisamos desarrollar una actividad de cultivo agrario forrajero que genere empleo, que fije la población al medio rural y contribuya al aumento del autoconsumo ganadero en nuestra región*". Sin embargo, y bajo nuestro punto de vista, si no se tienen en cuenta los argumentos presentados en este artículo, el objetivo de "*desarrollar una planificación que permita aumentar significativamente el autoabastecimiento de insumos de producción insular, a la vez que potenciamos una subindustria agraria de cultivo forrajero que a la vez que genere empleo*", será difícilmente alcanzable. La otra cara de la moneda que habría que cuantificar para conocer el balance de la sustitución de las importaciones de forrajes serían los posibles incrementos de costes a los productores ganaderos y los recursos derivados a la producción de forrajes. En principio, si se mantienen los precios actualmente pagados por el input productivo (forraje), no tendría ninguna repercusión en la cuenta de resultados del sector ganadero, siendo una medida neutral a este respecto.

También tenemos que tener en cuenta los recursos desviados a la producción de forrajes, derivados fundamentalmente de la disponibilidad de agua y suelo para su utilización en estos cultivos. En este caso, el límite económico que implica la neutralidad de la medida se

situaría en la suma de recursos financieros dedicados a este suministro en relación con la actual ayuda del REA y el incremento de recaudación por la mayor actividad económica.

El coste de producción de forrajes. Desterrando mitos

Dado que uno de los argumentos en los que se fundamenta el REA es la incapacidad del mercado interior canario para satisfacer la demanda de determinados sectores en cantidad y precios adecuados, queremos ilustrar un ejemplo que desmienta esa percepción. Con estudios experimentales a nivel local realizados en los últimos años (Palacios et al, 2013) podemos determinar el coste de producción de la maralfalfa como producto forrajero normalizando los valores obtenidos a nivel de hectárea como unidad de superficie. La producción estimada (expresada en términos de materia seca por hectárea y año) es de alrededor de 90 toneladas (89,64 Tm/ha), que será nuestra producción de referencia para zonas cálidas adaptadas al cultivo de esta especie. La inversión inicial en las instalaciones y la maquinaria básica para la puesta en marcha de la explotación se ha cuantificado en unos 51.200 €/ha. Este importe se ha estimado a partir de la adición de los siguientes componentes:

- Instalaciones de riego: 18.000 €/ha.
- Adquisición de maquinaria: 32.300 €/ha.
- Establecimiento y preparación cultivo: 900 €/ha.

Siendo prudentes en la aplicación del coste de inversión y la vida económica de los activos adquiridos e instalados, podemos asumir un coste anual de consumo de capital del 10% para las instalaciones y maquinaria, y del 20% para el establecimiento inicial. Con esta premisa, el coste anual del capital podría ascender hasta los 5.210 €/ha/año. El importe estimado por el uso de la tierra se ha cuantificado en unos 1.951 €/ha/año, valor que proviene de la capitalización del precio medio de la tierra contenido en la Encuesta de Precios de la Tierra, para terrenos de secano pues se incluye el coste de instalación del sistema de riego. La mano de obra directa necesaria para la explotación se ha calculado en los términos siguientes: 9 días/ha/año tractorista, 9 días/ha/año operarios corte y peón a media jornada /ha/año. Dado que los dos primeros pueden subcontratarse para las labores de siembra y corte, se ha considerado exclusivamente el coste de mano de obra directa del peón, estimando un importe anual de unos 18.000 €/peón, lo que supone un valor de 9.000 €/ha/año. Los suministros que le corresponderían a una superficie de una hectárea a lo largo del año, se componen de abonos (N, P y K) y productos fitosanitarios. En el caso de los abonos, se estima un importe de 3.173 €/ha/año; mientras que los productos fitosanitarios representan unos 200 €/ha/año. El total de suministros alcanza los 3.373 €/ha/año. Por último, tenemos diversas actividades y otros costes (alquiler de tractor, transporte y labores de corte) que se ha calculado que alcanzan un importe de 2.520 €/ha/año.

En la Tabla 1 se presenta un resumen de los costes citados.

Tabla 1. Coste de producción forrajes por ha/año y por t de materia seca. Fuente: Elaboración propia.

COSTES	€/ha/año	€/t
Tierra (Capital)	1.951	22
Otros (Capital)	5.210	58
Suministros	3.373	38
Mano de obra	9.000	100
Otros	2.520	28
TOTAL	**22.055**	**246**

Dada la estimación de producción anual por hectárea de 90 toneladas, el coste de producción por tonelada se estima en unos 246 €. A este importe, habría que añadir el coste del agua de riego. Esta cifra destierra el mito de que el coste de producción de cultivos forrajeros para alimento de la cabaña ganadera del archipiélago hace inviable plantear su explotación, y se hace necesario importar del exterior con ayudas para abaratar costes.

Ganancias en el Producto Interior Bruto y en el empleo. Aumento de la renta disponible

De acuerdo a los datos de explotación que hemos aportado, para el cultivo bajo riego de unas 926 hectáreas, se necesitaría el concurso de agua, mano de obra, suelo y otros capitales. Para cuantificar los efectos sobre la actividad económica de un cambio en la orientación de la política económica (sustitución de las ayudas del REA a la importación de forrajes por ayudas a la producción) deberíamos recurrir a un estudio econométrico basado en el modelo Input-Output. El problema de seguir esta línea es la base de información. En el caso de Canarias, los últimos datos I/O disponibles [página WEB Instituto Canario de Estadística] se corresponden a 2005 (hace 10 años). Los cambios estructurales desde ese ejercicio han sido tan grandes que invalidarían cualquier resultado que propusiéramos. No obstante, tenemos una solución a este inconveniente que es analizar de forma individualizada los factores productivos que componen la producción forrajera, y estimar sus efectos de forma aditiva. En este apartado, por tanto, cuantificaremos el valor de cada uno de estos factores productivos, en términos económicos de su aportación al Producto Interior Bruto (PIB), así como el efecto conjunto sobre la economía de la sustitución de importación de forrajes.

Todos estos agregados son el resultado de una actividad económica generada por la producción de especies forrajeras en el ámbito local frente a su importación, que no genera actividad productiva en este sector.

De acuerdo a lo señalado en apartados anteriores, de las cuentas de explotación de las tierras puestas en uso para la producción de cultivos forrajeros, obtenemos los agregados económicos para cuantificar su efecto sobre el PIB y la actividad económica. Estos agregados económicos se han identificado en los siguientes: Retribuciones Salariales (coste de la mano de obra empleada), y el cálculo del Excedente de Explotación a través de la aportación de capital (tierra y otros capitales productivos) y otros inputs. De esta forma, cuantificando cuatro componentes de la estructura productiva de las explotaciones obtendremos su contribución al PIB, no estimando los consumos intermedios (consumibles y otros) que estarían en los agregados de sus correspondientes sectores productivos.

Tabla 2. Agregados del PIB en el cultivo de Maralfalfa. Fuente: Elaboración propia.

AGREGADOS PIB		VALORACIÓN		
		Por ha	Por Tm	TOTAL
Remuneración de Asalariados		9.000	100	8.333.333
Excedente Explotación	Tierra	1.951	22	1.806.797
	Otros capitales	5.210	58	4.824.074
	Otros Inputs	2.520	28	2.333.333
Ayudas REA (No aplicadas en la importación)		6.454	72	5.976.000
TOTAL		**25.135**	**280**	**23.273.538**

Cifras en € por hectárea, tonelada y total. Sin incluir el coste del agua ni efectos indirectos. El total se ha calculado en unas 926 hectáreas y una producción de 83.000 toneladas de forraje.

Para la remuneración de los asalariados, se ha estimado la generación de unos 537 puestos de trabajo directos en la puesta en explotación de la superficie contemplada para

producir unas 83.000 t de forrajes. Los empleos indirectos, pueden estimarse en términos bastante conservadores en un 20% adicional, alcanzando un total de unos 644 puestos de trabajo a tiempo completo. En términos económicos, supone una aportación al PIB, en términos de rentas salariales, de unos 9,3 millones de Euros (8,3 millones de Euros los empleos directos y casi 1 millón de Euros los empleos indirectos).

El primer componente del excedente de explotación, las rentas derivadas de la utilización de la tierra, puede aportar otros 1,8 millones de € en términos de contribución al PIB. Este valor es el resultante de capitalizar el precio del terreno actual al 4% en 25 años. Representa el coste de uso o arrendamiento del terreno. Este valor se ha obtenido de la Encuesta de Precios de la Tierra del 2012 para Canarias (último ejercicio disponible) y se ha seleccionado el indicador medio correspondiente a los "pastizales de secano", que alcanzaron un importe medio de unos 30.484 €/ha en ese año. El segundo componente del Excedente de Explotación que cuantificamos, el empleo de otros capitales productivos (diferentes de la tierra) en las actividades de explotación, aportaría unos 4,8 millones de € al PIB del archipiélago. Estos capitales se refieren a las inversiones en maquinaria y otras instalaciones, cuyo flujo anual por hectárea se ha estimado en unos 5.210 Euros. El tercer componente del Excedente de Explotación, referido a la aportación de otros inputs productivos a las explotaciones, generaría actividad económica en otros sectores económicos (alquiler de tractores, maquinaria de corte y medios de transporte, no pertenecientes a la propiedad de la explotación) cuantificable en su conjunto en unos 2,3 millones de € adicionales (unos 2.520 €/ha y año). Por último, y siguiendo por las importaciones, podemos cuantificar un ahorro por pagos dejados de realizar derivados del actual sistema del REA, que se propone sea sustituido por producción local de forrajes. El importe de estos pagos dejaría de representar una salida de recursos (importaciones) para convertirse en recursos interiores de Canarias, e implicaría unas rentas de unos 6 millones de €.

En síntesis, la producción de forrajes en las Islas que sustituyan a las actuales importaciones, podría aportar, cuanto menos, al PIB algo más de 23 millones de € adicionales, sin tener en cuenta otros efectos indirectos. Habría que añadir el pago de impuestos por la producción y generación de rentas derivados de la actividad dentro del haber de las AAPP. En esencia, no se trataría de rentas generadas propiamente, sino sustitución de renta de otros territorios de los que actualmente se importan estos productos forrajeros. Es decir, sería una sustitución geográfica o territorial de rentas, ya que se sustituiría la retribución de factores productivos implícitos en la importación por factores productivos interiores del archipiélago. Para completar este análisis tendríamos que determinar los elementos que condicionan la consideración como óptima y eficiente de esta medida: factores productivos actualmente en desuso y su coste. En el caso de la disponibilidad de terrenos aptos para el cultivo, baste señalar que actualmente en la isla de Tenerife el 57% de la superficie agrícola (24.500 ha) se encuentra sin cultivar (Cabildo Insular de Tenerife, 2012). La mano de obra tampoco sería un factor escaso en estos momentos (tasa de paro de casi el 33%, EPA Canarias II Trimestre 2014).

Sin embargo, un factor verdaderamente condicionante sería el agua disponible (en cantidad y precio). Se precisaría (como máximo) para poner en explotación estos cultivos un volumen de unos 24 hectómetros cúbicos de agua. La exigencia de calidad de este recurso no sería elevada pudiéndose recurrir al aporte de recursos regenerados (con o sin un tratamiento terciario más o menos costoso). En este sentido, Palacios et al (2008) argumentaron que el coste de dichos recursos dependería de la calidad del efluente, pudiendo variar entre 0.42 €/m3 si fuera necesario desalar el agua posteriormente a su depuración y 0.2 €/m3 si la calidad del agua regenerada permitiera su uso directo, con un nivel de tratamiento compatible con el que se requiere para el riego localizado de estos cultivos en el RD 1620/2007 de reutilización. A este coste habría que añadir 0.08 €/m3 por

cada 100 metros de bombeo. Por tanto la carencia de agua no parece ser un factor limitante, dado que sólo en la isla de Gran Canaria el avance del Plan Hidrológico cuantificaba los vertidos de aguas residuales al mar (depuradas y sin depurar) en unos 37,4 hectómetros cúbicos en 2007 (Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria, 2013).

Toda vez que el volumen de recursos disponibles no supone un factor limitante de la explotación, nos detenemos en el análisis de precios del agua para determinar el umbral de rentabilidad y eficiencia asignativa de la medida. En función del precio por unidad de recurso empleada (€/m^3), obtenemos una función lineal de costes crecientes que representamos gráficamente (Figura 1).

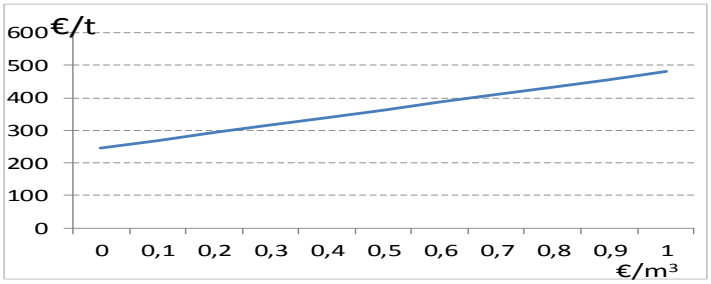


Figura 1. Coste producción (€/t) en función del precio del agua (€/m^3). Fuente: Elaboración propia.

Según esta función de producción, nuestro umbral de rentabilidad sería aquel precio del agua que no suponga un coste de producción superior a unos 350 €/t de forraje, que sería actualmente el precio de importación del forraje sin descontar las ayudas del REA, lo que situaría el precio del recurso en un intervalo comprendido entre 0,40-0,50 €/m^3 (entre 14 y 18 €/hora de agua). Todo precio del agua inferior a este nivel permitiría garantizar la rentabilidad y eficiencia del cultivo, en los términos productivos citados para el cálculo de este artículo (cultivo de una gramínea C4 muy productiva y eficiente en el uso del agua y suelo). Estudios recientes permiten suponer un consumo de agua incluso más efectivo en determinadas condiciones agroclimáticas por lo que esta estimación podría corregirse al alza. Para cultivos menos eficaces en el consumo de agua (peor transformación L agua consumida por kg materia seca formada) o para aquellas regiones en las que la lluvia supone un importante aporte de agua, estas estimaciones deberían revisarse. Junto a este planteamiento de naturaleza económica cabe plantear los potenciales beneficios ambientales y sociales de la implantación de este cultivo y la sustitución de forrajes foráneos por locales. Sin ánimo de ser exhaustivos, en el primer grupo, esta medida permitiría reducir los vertidos de aguas depuradas, fijaría terrenos sujetos a erosión, reduciría el consumo energético y sus emisiones (derivado del transporte). Como beneficios sociales podríamos agregar la fijación de población al territorio, incremento de la renta disponible y disminución de la tasa de desempleo.

CONCLUSIONES Y CONSECUENCIAS

La escasa disponibilidad de agua a bajo precio (precio que, en el caso del agua regenerada, es determinado por los gestores del agua y publicado oficialmente), y el actual régimen de ayudas del Régimen Especial de Abastecimiento (REA), decidido a nivel político y que reduce el importe a pagar por el forraje importado frente al producto local, explican que el autoabastecimiento forrajero sea actualmente un objetivo inalcanzable en Canarias. De hecho, el sector forrajero está desprotegido en Canarias por efecto de la existencia de ayudas al sector ganadero en términos de subvenciones a la importación de forrajes. Es factible fomentar una política de sustitución de importaciones (que no genera actividad productiva en el sector ganadero) por el cultivo de forrajes de alta productividad. Pero, para

considerar si esta medida es óptima y eficiente, en este artículo se analizan los diversos factores productivos, todos actualmente en desuso, menos el que verdaderamente actúa como condicionante, que es el agua disponible (en cantidad y precio). Así, y de acuerdo a los cálculos, se demuestra que es posible producir especies forrajeras en el ámbito local reutilizando el agua en lugar de verterla, siendo financieramente viable con precios del agua en un rango de 0,20-0,30 €/m^3 (precios asumibles para aguas regeneradas con un nivel de tratamiento compatible con la legislación de reutilización). Por tanto, la producción de maralfalfa podría ser competitiva frente a la importación, una actividad económica que generaría ganancias en el PIB (que se cifrarían en algo más de 23 millones de euros) y un aumento de la renta. Además del incremento del PIB, la aportación económica de estos cultivos podría representar la creación de unos 640 nuevos puestos de trabajo y la puesta en valor de tierras actualmente no explotadas. Bajo este supuesto, el ahorro de las ayudas del REA para la importación se cifraría en 6 millones de euros. Si se destinara esta cantidad (o una parte de ella) al fomento de la producción forrajera local, la rentabilidad sería aún mayor y, por tanto, el precio que podría pagarse por el agua se incrementaría. Alternativamente, con el ahorro de las partidas destinadas a la importación podría subvencionarse parte del coste del agua regenerada, la construcción de instalaciones de posibilitaran la reutilización o la puesta en regadío de tierras abandonadas.

El importe de estos pagos dejaría de representar una salida de recursos (importaciones) para convertirse en recursos interiores de Canarias. No se trataría de rentas generadas propiamente, sino sustitución de renta de otros territorios de los que actualmente se importan estos productos forrajeros. Es decir, sería una sustitución geográfica de rentas, ya que se sustituiría la retribución de factores productivos implícitos en la importación por factores productivos interiores del archipiélago.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por MINECO, Proyectos de Investigación Fundamental (CGL2012-39520-C03-03) y Agencia Canaria de Investigación Gobierno de Canarias (SolSubC200801000012). Los autores también quieren agradecer a D. Emilio Fernández Armas por las ideas aportadas.

REFERENCIAS

Cabildo Insular de Tenerife (2012). *Los cultivos en Tenerife. Aspectos territoriales*. Servicio Técnico de Agroindustrias e Infraestructura Rural. Santa Cruz de Tenerife. 39 pp.

Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria (2013). *Avance Plan Territorial Especial Hidrológico de Gran Canaria (PTE 04)*. Volumen I, Tomo III, Anexo nº 3 Inventario de Recursos Hídricos. Las Palmas de Gran Canaria. 34 pp.

Instituto Nacional de Estadística (2014). *Encuesta de Población Activa de las Islas Canarias. II Trimestre 2014*. www.ine.es.

Instituto Nacional de Estadística (2014). *Encuesta de Precios de la Tierra 2012.* www.ine.es.

Márquez, F.; Sánchez, J.; Urbano,D. and Dávila, C. (2007). *Evaluación de la frecuencia de corte y tipos de fertilización sobre tres genotipos de pasto elefante (Pennisetum purpureum*). 1. *Rendimiento y contenido de proteína.* Zootecnia Trop. 25(4) 253-259.

Palacios, M. P., Fernandez-Vera, J. R., Fernández-Pinazo, F., Echevarria, F., & Hernandez-Moreno, J. M. (2008). *Desalination versus Reclaimed water reuse under sustainability criteria: the energy point of view.* UNESCO UCI International Conference on Water Scarcity, Global Changes, and Groundwater Management, Irvine California.

Palacios-Díaz M.P.; Mendoza-Grimón, V.; Fernández-Vera, J.R. and Hernández-Moreno, J.M. (2013) *Effects of defoliation and nitrogen uptake on forage nutritive values of Pennisetum sp*. J Anim Plant Sci 23: 566–574. 2013. Available from URL: http://www.thejaps.org.pk/docs/v-23-2/37.pdf

Plan Forrajero de Canarias 2014/2020 (PFORCA, 2014). Borrador comité científico de expertos.

ISBN: 978-84-938046-4-0

ARQUITECTURA Y PAISAJE DEL AGUA

Juan Manuel PALERM SALAZAR

Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, ETS de Arquitectura. Catedrático de Arquitectura (Proyectos Arquitectónicos). jpalerm@paltab.com; jm.palerm@ulpgc.es; jpalerm@iuav.it

RESUMEN

El estudio de las edificaciones hidráulicas y el caso ejemplar de un sistema urbano, cuyo crecimiento se apoyó en la trama hidráulica, pretende dejar constancia de la importancia del agua sobre el paisaje canario. Molinos, norias, acequias, estanques y embalses configuraron el paisaje directamente, constituyendo por sí solas líneas visibles al condicionar la disposición del terreno agrícola y de algunos asentamientos poblacionales. En relación con lo urbano, la arquitectura del agua, erigiéndose tanto como elemento de borde o como elemento protagonista y de cualificación urbana, presenta una indiscutible identidad del lugar, capaz de dar pauta y norma a la construcción del territorio y la ciudad.

Palabras clave: *edificaciones hidráulicas, sistema urbano, arquitectura del agua, paisaje*

ABSTRACT

The study of hydraulic buildings and the exemplary case of an urban system, whose growth was supported by the hydraulic frame, intended to acknowledge the importance of water on the Canary landscape. Mills, wells, ditches, ponds and reservoirs directly shaped the landscape, constituting themselves visible to condition the provision of agricultural land and some settlements lines. In relation to the urban, architectural water, being elevated as much as edge element or as protagonist and urban qualification element has an undeniable identity of the place, capable of tone and standard for the construction of the territory and the city.

Key words: *hydraulic buildings, urban system, water architecture, landscape*

AGUA Y TERRITORIO

Existe una casi infinita red de acequias que atraviesan las islas occidentales en todas direcciones, tomando y dejando agua en distintos lugares, a veces distanciados muchos kilómetros entre sí. El caudal que discurre por cada uno de ellos, por separado, es pequeño y discontinuo. La mayor parte de su agua -hoy- es extraída de pozos o galerías. En raras ocasiones proviene directamente de fuentes. Y en menos ocasiones aún, de cursos naturales de agua. De por sí ya son un elemento a considerar sobre el paisaje. Al tratarse de acequias pequeñas y descubiertas van adaptándose lo más posible a las curvas de nivel de barrancos y montañas. Tan sólo cuando se hace estrictamente necesario saltarán a la otra margen del barranco. En estos casos aparecerán los acueductos. También estrechos, pero muchas veces de gran altura, demostrando un esfuerzo de obra desproporcionado al caudal

que transportan. Se hace difícil -hoy- comprender estos largos recorridos sin considerar que era necesario llevar el agua desde las zonas de medianías, a veces desde el centro de las islas, hasta la última finca de costa. A cualquiera de las líneas principales se irán sumando las aportaciones de otras acequias cuando la cota hidráulica lo permita. Y de ésta, a su vez, saldrán derivaciones, primero mayores para el regadío de áreas o municipios y que, tras sucesivas *Cantoneras* llegarán a morir en las pequeñas acequias que conformaban, en el interior de una finca, hasta hace poco, el último paso del agua al surco de tierra al pie de la planta.

Esta red, a pesar de la fuer*za* de implantación que posee sobre el paisaje no es el único elemento hidráulico de importancia. Debido a la irregularidad de los cauces, la especial división en dulas de las aguas y su estructura de propiedad aparecen los estanques y presas. Los estanques, por su número, salpican el recorrido de las acequias, sus formas variables en función de los materiales utilizados en cada época se encuentran ocupando las superficies altas de las fincas, normalmente como las propias edificaciones de uso agrícola y en muchas áreas superando a éstas en número. Esto también constituye una característica: la forma de asentamiento de la edificación en relación a la topografía particular de cada finca.

La trama, que hemos compuesto, formada por las líneas del recorrido del agua, cantoneras y estanques, definen el paisaje, como una sucesión de objetos, a ella hay que sumar las edificaciones que albergan las máquinas hidráulicas, ya sea las que utilizan el agua como fuerza *motriz,* o las que, a la inversa, extraen o elevan el agua mediante una *fuerza* auxiliar. De entre ellas se han tomado dos ejemplos: un molino y una noria (figura1). Ambas deben verse no sólo desde su interés arquitectónico como edificio aislado, de por sí importante, sino sobre todo como pieza y principio de una red que atraviesa todo el territorio circundante y que por tanto constituye un nuevo elemento característico y con capacidad de inducción en el proceso de *proyectación* del paisaje que las rodea.

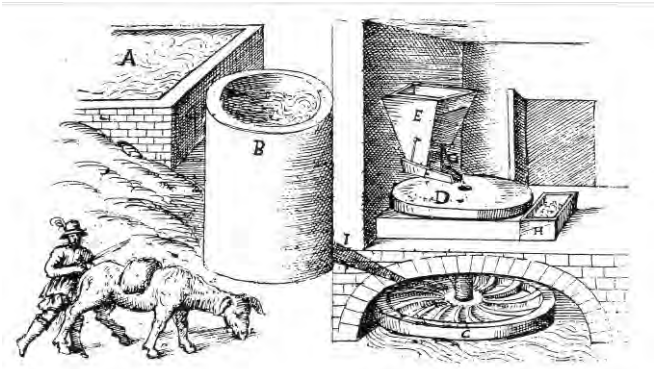


Figura 1. Descripción del funcionamiento del molino horizontal. Seudo Juanelo Turriano.

Pasemos a hablar, pues, de las piezas hidráulicas. Después del fuego probablemente fuese la rueda hidráulica el segundo gran invento de la humanidad. El primero le facilitó la transformación de la materia; el segundo, lo liberó del trabajo físico. La rueda hidráulica, descrita ya en los primeros tratados (v.g. Vitruvio) aprovecha un caudal de agua permanente para producir un movimiento rotacional utilizable como energía, ya sea para elevar agua o para mover los mecanismos de cualquier máquina. La mayor parte de las ruedas que aparecen en los tratados antiguos funcionaban mediante la presión que una corriente continua ejercía sobre la parte sumergida de la rueda. Ahora bien, el caso de las islas, no constituye un ejemplo de la posibilidad de implantación de estas ruedas verticales. El escaso caudal y su temporalidad hizo necesario que el sistema utilizado fuera el de la rueda horizontal -antecesor de la turbina- que aprovecha el golpe de un pequeño caudal de agua a presión sobre los álabes. Este sistema aparece explicado y dibujado en un tratado de Seudo

Juanelo Turriano (1500-1576), probablemente el primero dedicado exclusivamente a la hidráulica, de tiempos de Felipe II (Figura 1).

Se ha hecho esta descripción de los funcionamientos de la rueda para explicar a continuación la razón de la morfología de los molinos de agua. Lo más característico, lo que normalmente los hace reconocibles, es el cubo. Al ser un depósito de agua para obtener presión sobre la rueda, su altura se constituye en elemento fundamental y en auténticos obeliscos sobre el paisaje. En función de la topografía serán más o menos visibles y a su boca llegará la acequia suspendida sobre pilares como acueducto, o sobre un muro que se enlaza al cubo. Al pie de esta columna (el cubo) se situará el edificio que albergará el almacén y la maquinaria, y más abajo, normalmente en el sótano, en un lugar oscuro, húmedo e insalubre (quizás por esto la tradición popular lo ha relacionado con el lugar donde habita el demonio) se sitúa la rueda hidráulica. La altura del cubo vendrá determinada por el caudal disponible y la presión necesaria del agua sobre la rueda. Al tratarse en realidad de una torre construida para contener agua a alta presión, es frecuente que se construya de forma escalonada, de forma que la sección de mampostería vaya aumentando progresivamente hasta llegar a la base. El peso del cubo y el agua que contiene hace que éste no se sitúe sobre la casa sino normalmente detrás, lo que refuerza la imagen del conjunto en su visión normal desde la puerta del molino, desde abajo.

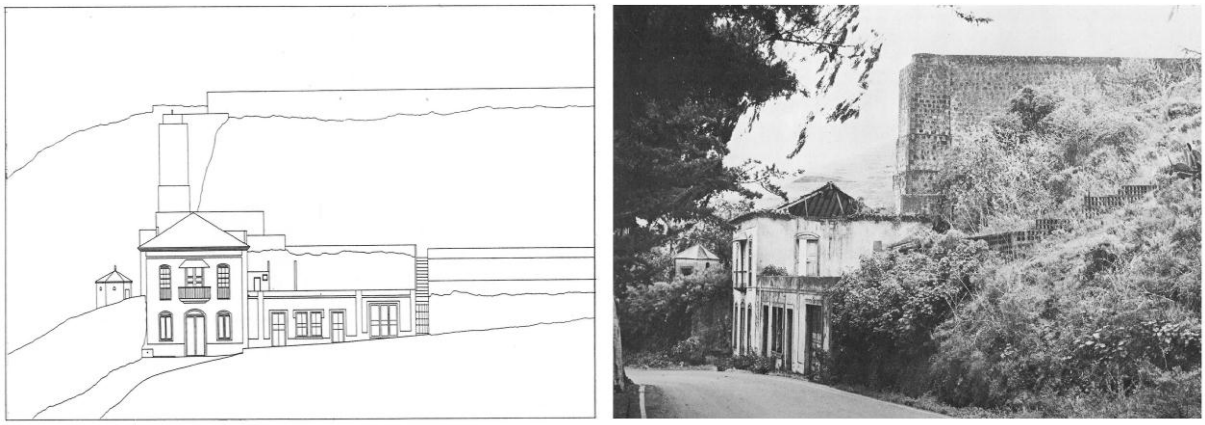


Figura 2. Molino Barber, (*)

Estas características funcionales explican la forma del molino de agua. Como casi siempre, la edificación sobre el territorio o sobre el paisaje constituye un hecho aislado y cada una de las funciones pueden desarrollarse morfológicamente con independencia. Esto hace que no sean edificios compactos, ordenados a partir de una única ley, sino piezas individuales agregadas que se giran y que se adaptan a cada situación territorial. El Molino de Barber (1905), figura 2), entre los términos Municipales de Santa Brígida y San Mateo en Gran Canaria poseía, derecho sobre el paso del agua, no sobre su uso directo. Es un eslabón una construcción, un ingenio e incluso una prerrogativa en la cadena de piezas que constituyen el recorrido del agua.

La noria constituirá la primera pieza de esta sucesión de elementos en el paisaje (figura 3). Su construcción (no fechada) puede ser de mediados del siglo XIX y no es en absoluto un elemento común en las islas. Además de su valor como máquina extremadamente sofisticada y perfecta, constituye un bellísimo ejemplo de arquitectura, como puede apreciarse en el levantamiento. Su interior, debido a la diferencia de cota hidráulica entra la basal y la extraída, está constituido por una sucesión de plataformas, escaleras y ejes sin correspondencias verticales. Un espacio auténticamente piranesiano. Su plano de situación muestra, deliberadamente, su entorno actual. La noria se encontraba anteriormente adosada al lateral de barranco y rodeada de palmeras. Ambos elementos, individualmente, como

otros muchos del paisaje insular tienen su indudable valor arquitectónico. Sin embargo, mayor importancia aún poseen como parte de un conjunto constituido por toda la serie de elementos que seguían en su disposición el orden único de la ley de la gravedad en el curso del agua. Así, máquinas, acequias, estanques y embalses configuraron directamente progresivamente, elementos fundamentales en avance kilométrico, gran parte del paisaje, directamente, en tanto que por sí solas constituyen líneas visibles, e indirectamente, al condicionar la disposición de los cultivos, aterrazamientos, en el terreno agrícola, y la disposición de algunos asentamientos poblacionales y ciudades del archipiélago.

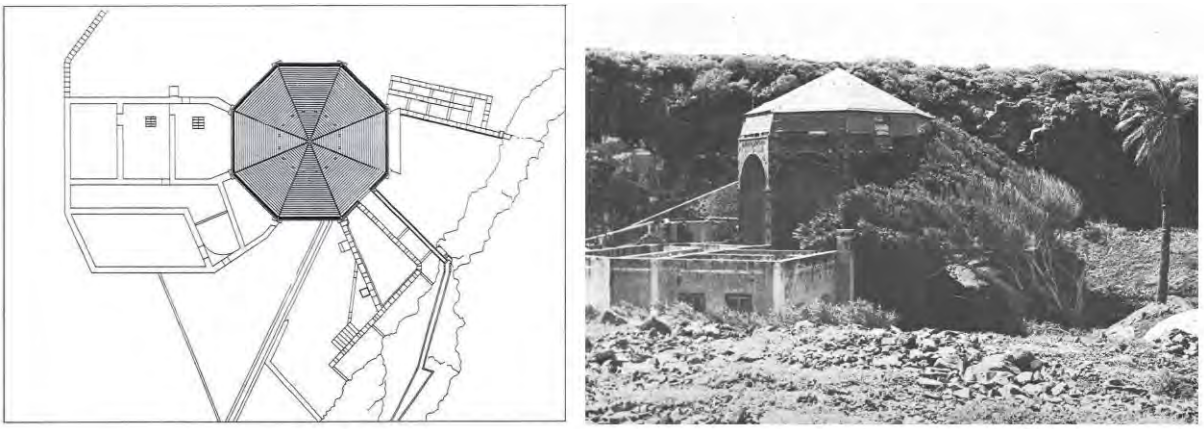


Figura 3. Noria de Jinamar(*)

LO URBANO

Hoy día este conjunto de relaciones entre agua, territorio y paisaje es legible sólo por elementos desconexos y parciales, casi *momentos* en el conjunto del territorio insular capaces de evocar, a través de un proceso analógico, la memoria histórica de lo que era y cómo era precedentemente, e incluso permitirnos la lectura, comprensión y no por último la fruición de la reinterpretación de un sistema urbano, hasta hoy día sin una investigación precisa salvo la que se desarrollo para este estudio en los años 90 por JA Sosa y JM Palerm (*)

Este pretendido distanciamiento del concepto de tiempo tiempo nos permite una mejor adecuación a los propios objetivos del trabajo, necesitando para ello de una presentación a modo de justificación. En el desarrollo de la disciplina escribía Mark Bloch (Bloch, 1930), en la introducción de su «Les caracteres originaux de l'histoire rurale française», *que existen momentos en los cuales una síntesis, e incluso una apariencia apriorística puede otorgar mayor servicio que el desarrollado por muchos trabajos de análisis, en donde hay momentos en los cuales Importa sobre todo enunciar bien los problemas, más que tratar de resolverlos. La historia rural, en nuestro país, paisaje y sus paisanajes, parece estar en uno de estos momentos. Lo que tengo intención de realizar, es esa visión del horizonte, que el explorador se concede previamente de adentrarse en el tupido bosque, en el que no se le posibilitan más amplias vistas*.

Pero si bien nuestro ánimo es éste, tendremos que ser conscientes de ese horizonte y manifestar una hipótesis, en la que el tipo de urbanización fundado sobre el consumo de tierra y sobre la dispersión de las intervenciones, comporta, como en el caso de la Villa de La Orotava, Güimar, Garachico, Icod y otras muchas ciudades canarias, una radical disolución de los principios de asentamiento. Las reglas soportes de los repartimientos y de la estructura de propiedad plantean los reales elementos reguladores de los procesos de edificación, mientras que los instrumentos urbanísticos corrientes muestran claramente la

incapacidad de tener conjuntados los objetivos generales de la transformación con las características físicas de la transformación misma. Esta constatación aparentemente obvia responde al problema general de la definición de los aspectos (reglas) que preceden a los procesos de construcción de la ciudad, y en particular, al hecho de, que éstos se presentan de un lado, fundados sobre una total abstracción respecto a las situaciones específicas; y de otro, basados sobre elementos del todo fragmentados y parciales, casi nunca reconocibles en una lógica unitaria.

En La villa de La Orotava(Tenerife), que siempre ha sido objeto de numerosas descripciones, en gran parte por su cualidad paisajista descrita en los textos (Nichols, 1583; y Espinosa, 1594) como categoría inseparable en la transformación histórica, afrontamos el estudio de lo urbano como una interpretación del objeto arquitectónico y su trazado (figura 4). El trazado de la conducción del agua sigue la dirección Sur-Norte, interceptándose a poniente con la Villa de La Orotava cualificando determinados puntos, *lugares* en las calles Castaño (hoy Doctor Domingo González), San Juan, San Francisco, Colegio, Cólogan, Inocencia García y Tomás Zerolo), así como algunos callejones. Aprovechando el gran desnivel existente en los extremos de la conducción, se encuentran escalonados diez saltos, que actuando sobre rodeznos dan fuerza a molinos harineros, de los cuales seis están situados a la derecha de la calle del Castaño; uno en la calle San Juan, uno en la de San Francisco y los dos últimos en la izquierda o al poniente de la calle del Colegio. Estos ingenios, como ya hemos mencionado, están configurados por un cubo de mampostería para la represa del agua y un par de ruedas hidráulicas horizontales (Rodeznos), para mover las ruedas o piedras giratorias del molino.

Es así, como este *tipo arquitectónico* complejo en su funcionalidad ofrece la otra vertiente de ser capaz de construir ciudad y ofrecer un *sistema urbano* con base en la propia conducción en donde se van acoplando las diferentes piezas urbanas de carácter público como Hospital de la Santísima Trinidad, Cementerio, ex colegio de los Jesuitas, Iglesia de la Concepción, Convento de San Francisco, Convento de Santa Catalina, así como las *casas solariegas* de Benítez de Lugo, Malina, Franchy-Cólogan, Machado, Valcárcel, Monteverde, Lercaro-Justiniani, Xuárez de la Guardia..., este *sistema urbano* se nos presenta como una interacción de elementos en donde la validez del *tipo arquitectónico* en su máxima expresión y el *trazado de la conducción* se erigen como *regla,* como característica esencial de este lugar.

Esta hipótesis la podemos ver representada en el plano adjunto (figura 4), ya no sólo de la villa de La Orotava, sino en los planos las casas de Güimar, Icod, y Garachico; donde las consideraciones enunciadas previamente toman el rango de invariantes.(*)

En el documento del Plan general de La Orotava del arquitecto Tomás Machado Méndez, en Agosto 1941, se puede comprobar cómo este sistema de Molinos y su ubicación, va a posibilitar no solamente el asentamiento de los *tipos arquitectónicos mencionados,* sino los puntos de referencia para el trazado de la ampliación de la Villa hacia el Sur, y en la zona del centro del casco, en su zona al Poniente, demostrando así esta hipótesis de que existe una correspondencia entre cualificación del área de la Villa y respuesta formal del asentamiento de los molinos en sus diferentes sectores. y partes. Por ello diferenciamos dos zonas en cuanto a esta particularidad:

A) El Borde de la Villa y su relación con el Territorio.

B) La Cualificación Urbana del Área Central.

El Borde de Villa, en su relación con el territorio agrícola, manifiesta ese papel de transición, por lo que aparece el molino, en una situación precisa, como un elemento más,

pero con intencionalidad de reorganizar ciertas partes en transformación como la Plaza e Iglesia de la Piedad, calle León, calle Cabo Alto; en donde, los *ingenios* se presentan como piezas de mediación entre la colmatación urbana y la huerta interna de ciudad. Es precisamente en la necesidad de ofertar un *lugar urbano* cuando el molino otorga su cualificación formal y su respuesta de foco de referencia, como en el caso del molino entre calle San Juan y calle Rosa de Lara, controlado a partir del trazado

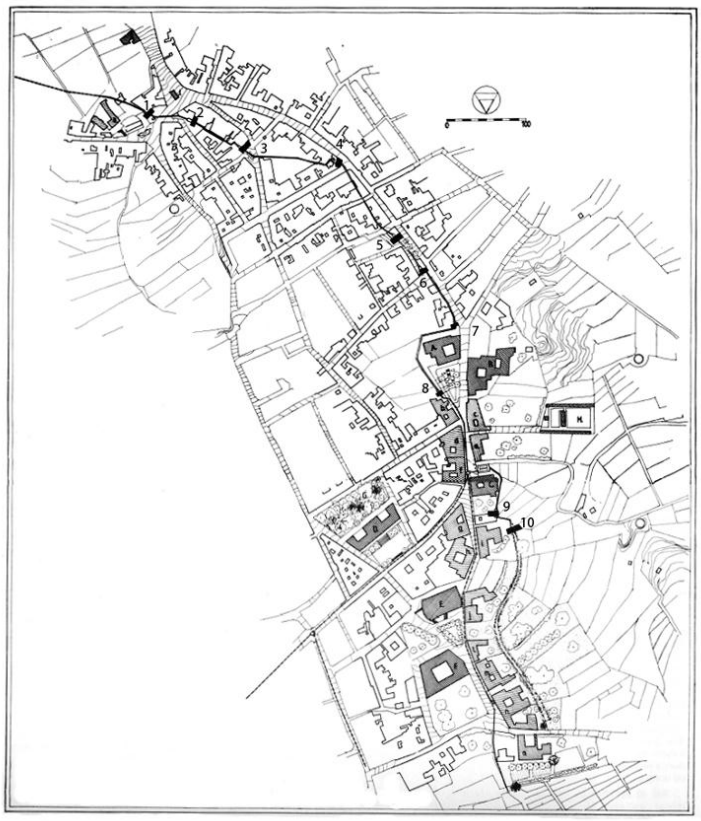


Figura 4. Villa de la Orotava. Plano de Situación de los Molinos (*)

Esto sucede en el conjunto de los dos molinos 5 y 6 en las calles Domingo González García (figura 5), Calvo Sotelo, Calle Nueva; en donde no sólo se presentan como directores del trazado viario de este sector de ciudad, sino cualifican un espacio urbano-plaza, y en el confortarse mutuamente en su entorno silencioso y educado manifiestan la belleza de un *momento* en la ciudad, que con las referencias literarias y pictóricas lo llenan de recuerdos, como muestra el cuadro de López Ruiz, a principio de siglo, que no sólo manifiesta lo atractivo del lugar, sino que nos deja uno de los únicos documentos gráficos, en donde se puede comprobar la construcción de la canalización en Tea entre los Molinos.

La cualificación urbana del área central, aquélla en donde se encuentra una de las concentraciones funcionales y de *tipos urbanos* más significativos dentro de la Villa. Se extiende desde Plaza San Francisco por la calle de San Francisco, calle Colegio, calle Cólogan, y en la que se sitúan el Hospital de la Santísima Trinidad, Iglesia de San Francisco, Iglesia de la Concepción, Correos y Telégrafos, Casa de Socorro, Instituto Nacional de Previsión, Cementerio, así como importantes *casas solariegas* muchas de ellas convertidas en casa Museo. , exposiciones, etc. Es precisamente esta acumulación y sucesión de elementos funcionales y morfológicos la que posibilita el *Silencio* y la adecuación del trazado y del *tipo* a esta parte de ciudad.

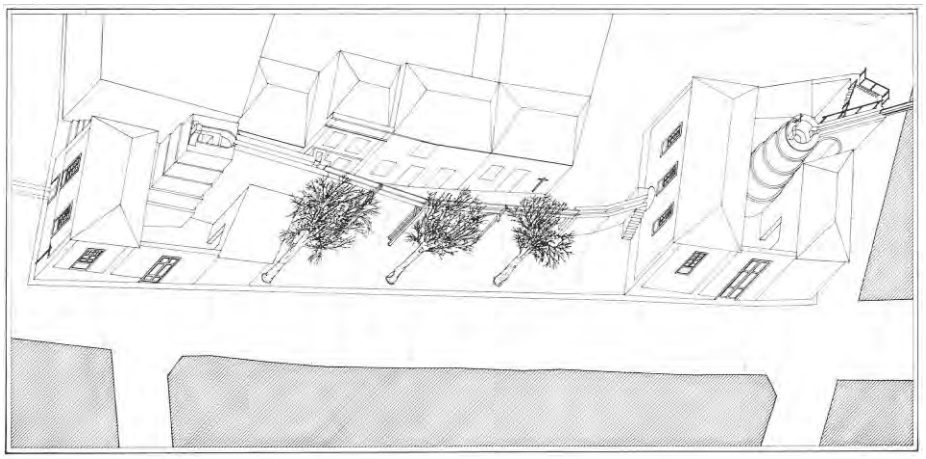


Figura 5. Molinos 5 y 6 en la villa del La Orotava (*)(indicados en la figura 4).

Así podemos comprobar, que desde el molino 7, sito en calle Domingo González hasta el situado en la plaza San Francisco, en frente del Hospital, se originará un cambio de trazado producido por la situación del antiguo convento, hoy solar de San Francisco, según plano de Melchor Zárate, que nos indica cómo, de alguna manera, en este área central se adapta el trazado a lo existente, hecho opuesto a las zonas anteriores, en los que el ingenio engendraba y cualificaba el sitio. Pero hay que notar que indevidenciar independientemente de la adecuación y respecto del trazado a los *tipos urbanos* de interés en el sector, se puede comprobar cómo morfológicamente existe igualmente una diferenciación, si bien no estructural, sí cualitativa, ya que *el molino* aparece inserto como si de un cuerpo más se tratase, a un conjunto morfológico unitario, no como pieza individual, que se erige en protagonista, sino como *punto* que admite una jerarquía y que posibilita su función urbana en el espacio urbano.

El volumen emergente del cubo sobre la edificación demuestra la fuerza volumétrica de este tipo arquitectónico en el contexto donde se ubica y en su articulación con el acuedeucto y edificación que se anexa, no tanto en la relación habitual como pieza de la *casa* del molino, sino como si de una escultura, de un monolito, que nos recuerda la propia estratificación histórica del lugar, se tratase. Después en su devenir hacia el mar, aparece el recorrido del agua, canalizada subterráneamente, dando la palabra a la ciudad con sus edificaciones, para emanar de nuevo, en los lavaderos con su función urbana, situado en la calle San Francisco y posibilitar a su vez, definitivamente, su doble misión: una, de objeto del territorio en los dos molinos traseros, al Poniente de la calle Colegio, y otra, su respuesta estrictamente urbana de abastecimiento de agua por la calle Colegio, Iglesia de la Concepción (Fuente), calle Cólogan, para acabar, como suponemos, en el jardín urbano del territorio Orotavense con sus acequias, estanques, jardines y , flores.

A modo de conclusión:

Las islas poseen una multitud de elementos de referencia capaces de dotar y controlar los diferentes procesos de urbanización del territorio; donde quizás, éste de la *arquitectura del agua,* presenta como hemos sintetizado en este artículo una indiscutible *Identidad del lugar* y a la que poco caso se le ha dado para erigirse como una de las piezas clave para dar *pauta* y *norma* a la construcción del territorio y la ciudad: El paisaje del Agua.

REFERENCIAS

(*) Este trabajo y todas sus imágenes y dibujos pertenecen al trabajo de investigación dirigido por los profesores Jose Antonio Sosa Dias Saavedra y Juan Manuel Palerm Salazar.

Assunto, Rosario. *Paesaggio e l'estetica 1. Natura e Storia*. Giannini Editore.

Bellidor, M (1737). *Architecture Hydraulique ou L'art de conduire, delever, et de menager les caux pour les differents besoins de la rive,* París.

de la Rosa Olivera, Leopoldo (1977) *La Orotava hasta 1650*. Aula de Cultura de Tenerife. Enciclopedia Canaria.

Dorfles, Gillo (1972), *Naturaleza y Artificio*. Palabra en el tiempo. Editorial Lumen Barcelona.

Foot, Nancy (1976). *Drawing the Line*, Artforum.

luav Dttepe (1981). *La Riviera del Brenta, proposta di una normativa architettonica*, Venezia.

Loos, Adolf, (1910). *Ornamento y Delito*. Arquitectura 1910. Editorial Gustavo Gilli. 2.ª edición: pág 221. Barcelona.

Maniglio Calcano, Analiza (1983). Architettura *del Paessaggio = evoluzione Storica*. Ed Calderim. 1.ª Edición, Roma, enero 1983.

Pseudo - Juanelo Turriano, *Los Veintiún Libros de Los Ingenios y de las Máquinas*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Editorial Turner, 1983, Madrid.

Quirantes, Francisco (1981). *El Regadío en Canarias*. Editorial Interinsular Canaria S. A. Departamento de Geografía. Universidad de La Laguna.

Vitruvio, Marco Lucio, *Los diez libros de Arquitectura*. Editorial Iberia, S. A. Barcelona, 1970

Rykwert, J (1974). *La casa de Adán en el Paraíso*. Arquitectura y crítica. Editorial G. Gili. Barcelona.

Sereni Emilio (1982), *Storia del Paesaggio agrario italiano*. Editori Laterza Bari

Mark Bloch (Bloch, 1930), «*Les caracteres originaux de l'histoire rurale française*»

ISBN: 978-84-938046-4-0

¿DÓNDE REUTILIZAR Y QUÉ REGAR? USO DE UN SIG PARA EL DISEÑO DE UNA RED DE REUTILIZACIÓN EN UNA ISLA VOLCÁNICA

Yessica PÉREZ GUZMÁN[1], Teresa MORANT DE DIEGO[2], Leví GARCÍA ROMERO[1], Luis HERNÁNDEZ CALVENTO[1], Vanessa MENDOZA-GRIMÓN[3] y María del Pino PALACIOS-DÍAZ[3]

[1] Departamento de Geografía, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 35413 Las Palmas de Gran Canaria, España, yperguz@gmail.com y luis.hernandez.calvento@ulpgc.es
[2] Departamento de Cartografía y Expresión Gráfica en la Ingeniería, teresa.morant@ulpgc.es
[3] Departamento de Patología Animal, Producción Animal y Ciencia y Tecnología de los Alimentos, Grupo GEOVOL. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 35413 Las Palmas de Gran Canaria, España, mp.palaciosdiaz@ulpgc.es

RESUMEN

El conocimiento de criterios que ayuden a priorizar el uso del agua es fundamental para garantizar su uso sostenible. En las zonas semiáridas, el abandono de la actividad agrícola puede estar motivado por la escasez de agua y por problemas de mercado de las especies tradicionalmente cultivadas. Por otro lado, la actividad ganadera, suele estar limitada por la escasez de forrajes. La disponibilidad de agua regenerada a un precio razonable podría evitar su vertido y contrarrestar la degradación de suelos abandonados, potenciando la producción de especies forrajeras rentables, contribuyendo así a la ganadería sostenible. Para ello se requiere optimizar la distribución del agua considerando varios criterios simultáneamente. Para alcanzar dicha optimización se ha diseñado un proyecto piloto SIG (Sistema de Información Geográfica) para la isla de El Hierro, que, incluyendo en su base de datos información agrometeorológica, georreferenciada, y combinando diferentes requerimientos, ha realizado los análisis espaciales necesarios para determinar el trazado y características de una futura red de reutilización, así ha proporcionado el cálculo del número de hectáreas regadas (21 has en zona cálida y 57 has en una zona algo más fría), bajo la aplicación de diferentes criterios técnicos y económicos.

Palabras clave: *red reutilización agua, ganadería sostenible, SIG, forrajeras.*

ABSTRACT

Knowledge of criteria to help prioritize water use is essential to ensure its sustainable use. In semiarid areas the abandonment of agricultural activity may be motivated by water scarcity and market problems of traditionally cultivated species. On the other hand, livestock farming, is often limited by the shortage of fodder. The availability of reclaimed water at a reasonable price could avoid its release and counteract the degradation of abandoned land, enhancing the profitable production of forage species, thus contributing to sustainable livestock. To do this it is necessary to optimize the water distribution considering several criteria simultaneously. To achieve this optimization a pilot project GIS (Geographic

Information System) for the island of El Hierro has been designed. This system included: an agrometeorological database, and other georeferenced information, and combining different requirements. It made the necessary spatial analysis to determine the layout and characteristics of a future network of reuse. It also has provided estimates of the number of irrigated areas (21 hectares in warm area and 57 hectares in a somewhat colder zone), under the application of different technical criteria economic.

Key words: *Network reuse water, sustainable farming, GIS, forage.*

INTRODUCCIÓN

En España suele destacarse como principal beneficio que la reutilización de efluentes tratados proporciona una fuente regular de agua a los usuarios y contribuye a asegurar la calidad, tanto desde un punto de vista sanitario como ambiental (Iglesias et al., 2010). Estos autores construyeron un Sistema de Información Geográfica (SIG) para optimizar la gestión de la reutilización bajo el desarrollo de cuatro aspectos: diseño de la base de datos, toma de datos de campo, comprobación y almacenamiento de los mismos y conexión de los mismos con un SIG. Se trataba de un SIG para manejar la información pero en el que los sistemas de almacenamiento y distribución hasta el usuario entraban como un punto más de la información de la base de datos, ayudando en la toma de decisiones del diseño de la red de reutilización.

El uso de herramientas para la optimización del diseño de redes de distribución de aguas es antiguo, asumiéndose generalmente el trazado como un hecho ya definido y utilizando las herramientas matemáticas para determinar con el mínimo coste los diámetros de las tuberías (Savic y Walters, 1997). A la hora de optimizar un sistema de distribución de agua, las técnicas y los objetivos pueden ser varios, como presentan Walski et al., 2003. En esta línea, Nobel (1998) combinó la programación lineal con el diseño de un SIG con varios escenarios posibles pero, para la optimización de la localización de los recursos hídricos, asumió que la red de distribución era directa entre la fuente y el usuario. También Oron (1996) utilizó la programación lineal construyendo una función que integraba todos los aspectos relevantes en el reuso agrario de una zona, incluyendo los aspectos de almacenamiento y transporte. Así mismo, Economopoulou y Economopoulos (2003) presentaron una metodología que integraba el conocimiento base y los procedimientos para desarrollar un sistema de reutilización basado en sistema de depuración natural adaptado a comunidades pequeñas.

Para poder asumir los costes del reuso del agua regenerada, hay que tener en cuenta una estimación de los mismos. Iglesias et al., (2010) proporcionaron datos de coste de operación y mantenimiento entre 0.06 y 0.09 €/m^3 para producir el agua con calidad apta para ser reutilizada en el riego de forrajes (incluido personal de mantenimiento y analíticas rutinarias), un coste de instalación entre 28 y 48 €/m^3 y día, dando un coste total (incluida la desinfección pero no impuestos, analíticas ni amortización) de 0.3 y 0.4 €/m^3. Por tanto, si se diseñan sistemas de depuración natural y el agua reutilizada se distribuye en zonas cercanas sin incrementar el consumo de energía, el coste del agua regenerada puede ser asumible para producir especies forrajeras.

Por otro lado, para que los sistemas sean sostenibles el uso de los recursos debe ser optimizado. Los estudios demuestran que la efectividad en el uso del agua de riego aumenta cuando se aplican dosis inferiores a las de consumo. Las plantas C4 tienen un metabolismo de fijación del CO_2 que las hace capaces de ser más eficientes en el uso del agua, por lo

que cuando las condiciones agroecológicas lo permiten, cuando estas especies se cultivan, con la misma cantidad de agua se puede producir mayor cantidad de materia seca.

En este trabajo, y teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, se presentan los resultados de la aplicación de un SIG para el trazado de una red de reutilización en la Isla de El Hierro (Figura 1A), al que, y como novedad, se introducen criterios agronómicos para su optimización, teniendo en cuenta los criterios que posibiliten la sostenibilidad del sistema propuesto.

Figura 1. Isla de El Hierro con la ubicación de la zona piloto (A) y su situación en las Islas Canarias (B).

MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención de la información existente

Se recopila la información disponible en el Plan Hidrológico de la isla de El Hierro (2002), que menciona cuatro Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR), la información proporcionada por GRAFCAN (de la que utilizamos las capas de información cartográfica correspondientes a la vegetación, la red viaria, la altitud y los actuales usos del suelo), la cartografía catastral y Modelo Digital del Terreno (MDT), simplificando dicho modelo con la herramienta Spatial Analyst de hidrología.

Tras las transformaciones necesarias, a través las diferentes herramientas del software SIG, a la información espacial anterior se le vincula la información termopluviométrica de las diferentes estaciones repartidas por la isla de El Hierro (26), así como los requerimientos edafoclimáticos e hídricos de las principales especies forrajeras, agrupándolas en dos: especies C3 y especies C4. Además, se introduce en la misma información relativa a las capacidades agrológicas de los suelos. De esta forma se genera la base de datos espacial. Para la elaboración de la información se utilizan diferentes herramientas del programa (rellano, acumulación de flujo, Shahler).

Herramientas empleadas

El software SIG empleado ha sido el ArcGIS. La base de datos alfanumérica ha sido access.

Elección de la EDAR y caudal disponible para el riego

Una vez analizada la información disponible, se define como zona piloto la EDAR de Valverde, situada aguas arriba de terrenos susceptibles de aprovechamiento forrajero (abandonados o dedicados a dicha producción). Esta EDAR, que da servicio a la capital de la isla, depura aproximadamente 600 m^3 de agua al día. Suponiendo un 10% de pérdidas en la conducción, se obtiene el agua disponible anualmente para regar: 197100 m^3.

Generación de capas de información

Una vez determinada la zona de estudio, aguas abajo y próxima a la EDAR de Valverde, se generan mapas de pendiente y altitud (6 clases). Se generan también mapas de las isotermas e isoyetas correspondientes, para lo que se interpola con el método de krigging la información de veinte estaciones termopluviométricas, teniendo en cuenta las altitudes y la disponibilidad histórica de los datos. Se dejan seis estaciones fuera de la interpolación para comprobar la bondad del método elegido. Posteriormente se utiliza la información parcelaria (transformando la información ráster del catastral a polígono, calculando los centroides de las parcelas) y se asigna a cada parcela de cada polígono la pluviometría que le correspondería, determinando aquellas parcelas que reciben menos de 5000 m^3/ha y año. Estas serán las parcelas que necesiten riego (el resto se considera que puede producir adecuadamente en secano). De la información sobre red viaria de Valverde, se extrae una nueva capa de información y se unen a través de las tablas de atributos las capas, sin analizar cuáles son las carreteras principales y secundarias.

Utilizando la herramienta de ArcGIS, Spatial Analyst de hidrología, se determina la ruta óptima que une, aprovechando la caída del terreno, la EDAR con las parcelas catastrales susceptibles de ser regadas, dado que se encuentran abandonadas o catalogadas como de aprovechamiento forrajero (pasto, labor y viña de secano), y reciben una pluviometría inferior a 5000 m^3/ha año. Con el MDT se calculan las líneas de máxima pendiente, que será por donde discurra el agua, para llevarla finalmente a las parcelas antes determinadas, utilizando en lo posible la red viaria ya existente.

RESULTADOS

Se presentan los distintos mapas generados con la metodología descrita. La Figura 2 presenta el mapa de vegetación de la isla a la que se ha aplicado una zona de recorte para determinar sólo la ubicada en la zona piloto (Figura 2A). Con el MDT y las coordenadas se localiza la EDAR y se construye un mapa con 6 categorías de pendientes, añadiendo posteriormente al mapa anterior la capa de altitud, construyéndose la Figura 2B.

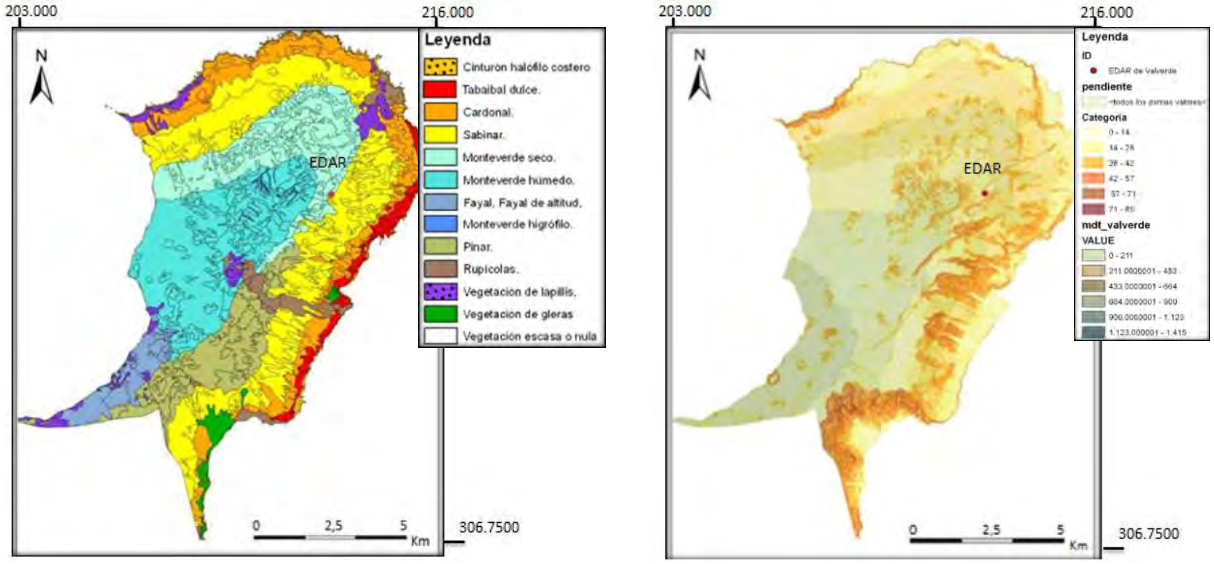


Figura 2. Mapa de la vegetación potencial de la zona piloto (A) y ubicación de la EDAR en un mapa de altitudes y pendientes con 6 categorías (B).

Con la información de 20 estaciones termopluviométricas (con diversa disponibilidad de los datos, unos con mayor serie histórica y otras con pocos años disponibles) e interpolando teniendo en cuenta las altitudes, se construyen dos capas de información, de isotermas e isoyetas. El proceso seguido es: se interpola la información con las 20 estaciones y se construye un mapa en el que además se ubican las 6 estaciones no utilizadas (Figura 3A), volcándose la tabla de atributos generada por el mapa en una hoja de cálculo. Dichos datos se comparan con los disponibles para las 6 estaciones no utilizadas en la interpolación, calculando así el error obtenido, que, por ejemplo, para las precipitaciones resulta inferior al 6.87%. Utilizando la información parcelaria se asigna a cada parcela la precipitación efectiva que le corresponde, construyendo dos categorías: parcelas que reciben más de 500 mm de agua de lluvia (Figura 3B, en azul oscuro) y las que reciben una precipitación inferior a esa cantidad (Figura 3B, en azul claro). Estas últimas parcelas se consideran prioritarias en su respuesta positiva al regadío ya que serán las que presenten más eficiencia en el consumo del agua aplicada. Se comprueba que aguas debajo de la EDAR todas las parcelas resultan prioritarias a efectos de establecer el regadío.

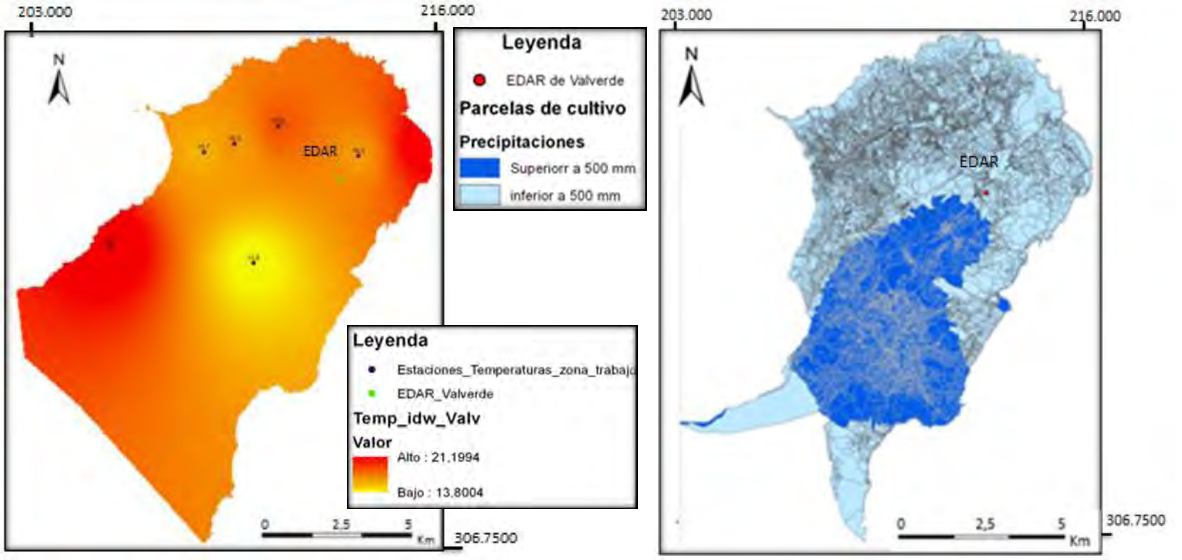


Figura 3. Temperatura media anual y ubicación de las estaciones térmicas utilizadas como control (A) y representación de las parcelas (B) según la pluviometría anual que reciben > 500 mm de agua de lluvia (en azul oscuro) y < 500 mm (azul claro).

A continuación, utilizando una herramienta del SIG que tiene en cuenta las distancias, se sitúan las pendientes y los puntos que representan el centro de cada parcela. Superponiendo esta información con la de la red viaria existente, se unen los centroides de las parcelas con la EDAR. Para su trazado, donde es posible, se aprovecha la red viaria y se siguen las líneas de máxima pendiente (que marcan la dirección del flujo) con el objetivo de abastecer el mayor número de parcelas posibles y siguiendo el criterio de mínima distancia. Se obtiene así un ejemplo de rutas, que se presenta en la Figura 4A.

Con la dotación proporcionada por las EDAR (197100 m^3/año) y, suponiendo unas necesidades de agua de 5000 m^3/ha y año, el número de ha que se pueden regar es sólo de 39,42 ha. Por tanto, es necesario limitar la zona utilizando criterios adicionales. Con la información de las temperaturas se determina que existe una zona más cálida al noreste que, aunque más lejana a la EDAR, permitiría el establecimiento de especies C4 (temperaturas medias anuales próxima a 17ºC) y otra zona más próxima a la EDAR más fría (Figura 4B) susceptible de siembra de especies C3 (con unos 13ºC de media).

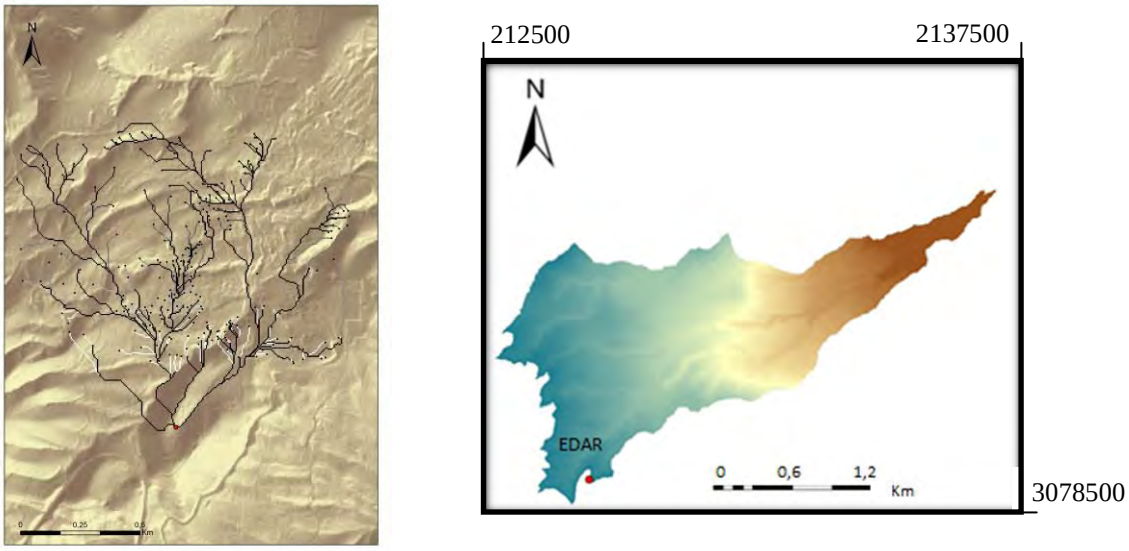


Figura 4. Redes de distribución de agua que unen la EDAR de Valverde con el centroide de cada parcela de cultivo, siguiendo para su trazado la red viaria y las líneas de máxima pendiente con el criterio de diseño de mínima distancia (A) y determinación de una zona más restringida teniendo en cuenta del MDT y las temperaturas (B), que discriminan la zona C3 (en azul) de la zona C4, más cálida (en marrón).

A partir de la información sobre capacidades agrológicas de suelo se determina que ambas zonas muestran curvas de retención similares, con valores en torno al 60-75% (Armas Espinel et al., 2013) y se priorizan las parcelas con pendientes inferiores al 13%. Superponiendo esta información a la capa de usos de suelo se construye la Figura 5A.

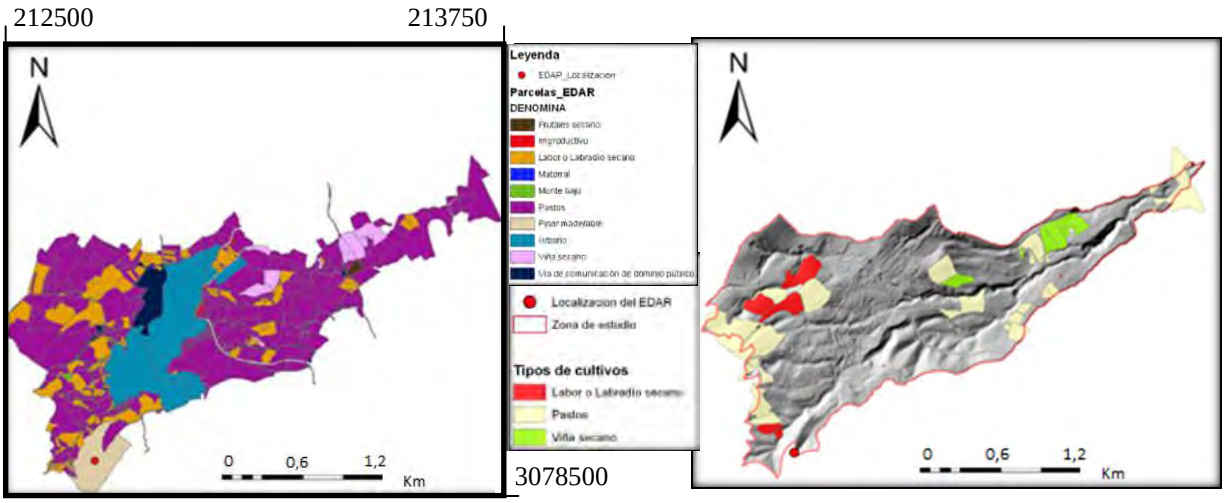


Figura 5. Capa de usos de suelo en la zona de estudio (A), delimitando las parcelas regables en las zonas de pastos, secano, zonas abandonadas y viñedos (B).

Se decide diferenciar dos dotaciones de riego: un riego de apoyo de 2500 m^3/ha y año, que complemente a las especies C3 que recibirán el agua de lluvia en esa época, (incrementando así la eficacia del agua aplicada), y riego el resto del año. También se considera esta dosis de apoyo para la zona de viñedo de secano, en la zona C4. La segunda dotación, de 5000 m^3/ha y año regará a las especies C4, sembradas a la salida del invierno. Considerando unos coeficientes de consumo de 550 y 350 L/kg MS para las C3 y C4 respectivamente, podrían regarse 240,15 has, cantidad aún 5 veces superior a las que la EDAR es capaz de abastecer.

Suponiendo que sólo aplicamos 2500 m^3/ha y año en la zona C4 y superponiendo la capa de usos del suelo (calculando la zona actualmente ocupada por cultivos forrajeros o pastos), se obtienen 15,9 ha regables. Si a estas se unen las ha de viña en secano, podremos alcanzar las 21,8 ha regables (Figura 5B). Teniendo en cuenta estas consideraciones el consumo hídrico por zonas sería:

- Viñedo en zona C4 regable. Superficie 59431m^2 x 250 litros/m^2= 14858 m^3.
- Cultivos forrajeros en zona C4 regable. Superficie 15900m^2 x 250 litros/m^2= 39750 m^3.
- El total consumido para esta zona C4 y con un riego de apoyo es de 54608 m^3.
- El volumen que aporta la EDAR es de 197100 m^3, que dividido entre 2500 m^3/ha, nos daría un total de 57 has que se podrían regar en la zona C3.

Aplicando la herramienta de ruta óptima, se realiza el trazado de la tubería que une las parcelas regables con la EDAR. En la figura 6 se presenta un ejemplo de cómo quedaría dicho trazado para la zona C3, separando distintos intervalos de costes de tuberías en función de la lejanía de las parcelas.

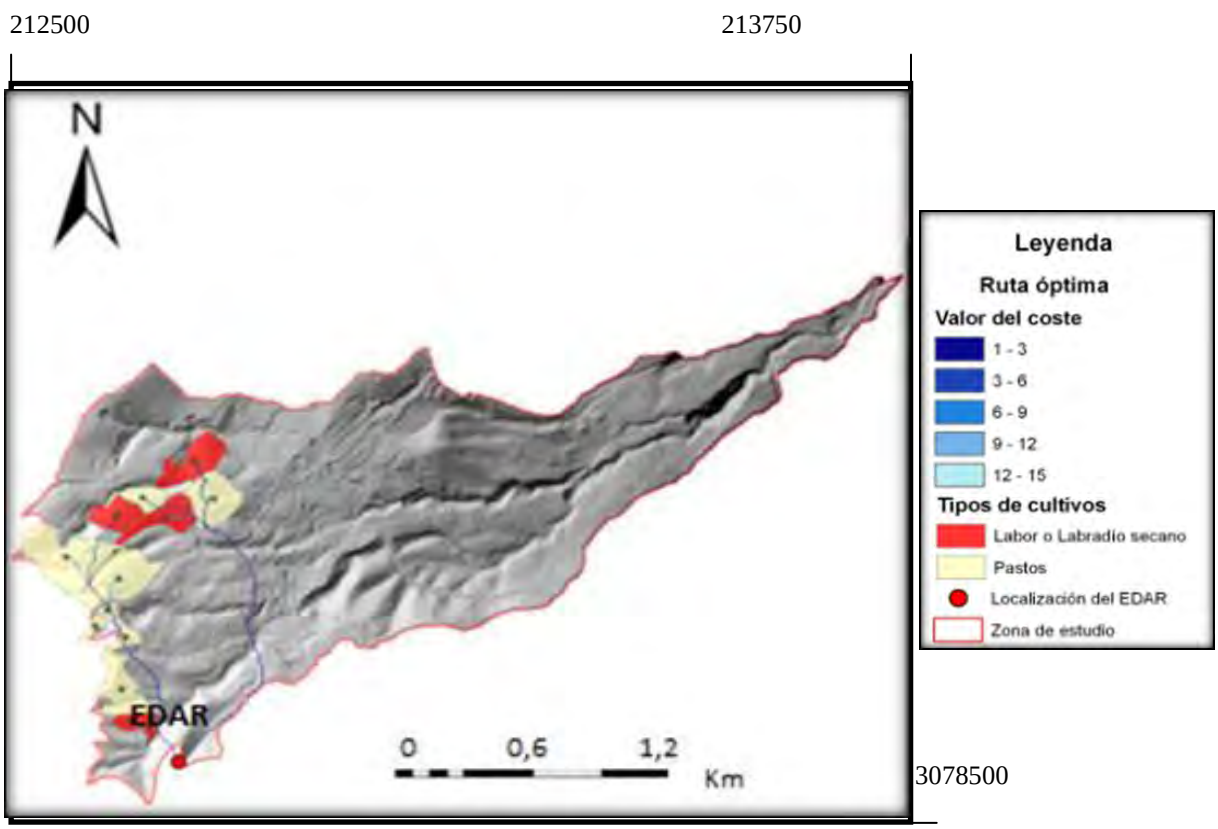


Figura 6. Trazado de la tubería que une las parcelas regables de la zona C3, que cumplen todos los requerimientos (pendiente inferior al 13%, suelos de capacidad agrológicas óptimas y con un aprovechamiento actual de pastos o secanos), con la EDAR.

CONCLUSIONES

El uso de Sistemas de Información Geográfica ha permitido definir la mejor estrategia para la reutilización de aguas regeneradas en una zona concreta determinando el trazado y

características de una futura red de reutilización. Para ello, teniendo en cuenta la información georreferenciada de las características edafoclimáticas, la orografía, las exigencias de los cultivos, el actual uso del suelo, las parcelas existentes y la disponibilidad de agua, y combinando diferentes requerimientos (mínimo consumo de energía, mejor eficacia en el uso del agua, maximización de la productividad por unidad de terreno o de la superficie regada) se han realizado los análisis espaciales necesarios para su diseño, lo que ha permitido el cálculo del número de hectáreas regadas bajo la aplicación de diferentes criterios técnicos. De este modo vemos que esta herramienta contribuye a la mejora de la producción de forrajes en Canarias, al optimizar la tecnología empleada para su producción. Así, con las diversas hipótesis expuestas y el caudal proporcionado por la EDAR, se han podido regar: a) 57 ha de especies tolerantes al frio pero con un consumo hídrico de 550 L/kg de MS, b) 21 hs de especies más exigentes térmicamente pero con un consumo hídrico de 350 L/kg de MS.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por Ministerio de Economia y Competitividad. Subprograma de Proyectos de Investigación Fundamental (CGL2012-39520-C03-03) y Agencia Canaria de Investigación del Gobierno de Canarias (SolSubC200801000012). Agradecemos la información proporcionada por Moisés Martín Betancor.

BIBLIOGRAFIA

Armas Espinel, S., Hernández Moreno, J.M. y Regalado, C.M. (2013). *Caracterización de la calidad física de suelos ándicos de Canarias a partir de la curva de retención.* Estudios en la Zona No Saturada del Suelo Vol. XI - ZNS'13, 43-49 pp. Universidade de Santiago de Compostela. ISBN: 978-84-616-6234-0.

Economopoulou, M.A. y Economopoulos, A.P. (2003). *Expert system for municipal wastewater management with emphasis in reuse*. Water Science and Technology.: Water Supply, 3(4): 79-88.

Iglesias, R.; Ortega, E.; Batanero, G. y Quintas, L. (2010). *Water reuse in Spain: Data overview and costs estimation of suitable treatment trains*. Desalination 263: 1-10.

Nobel, C.E. (1998). *A model for industrial water reuse: A Geographic Information Systems (GIS) approach to industrial ecology*. MSc Thesis, University of Texas at Austin, Austin, 1998, 142 pp.

RD1620/2007. *REAL DECRETO 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.*

Savic, D.A. y Walters, G.A. (1997). *Genetic algorithms for the least-cost design of water distribution networks.* Journal Water Research. Planning Manage. 123(2): 67-77.

Oron, G. (1996). *Management modelling of integrative wastewater treatment and reuse systems*. Water Science andTechnology, 33(10–11): 95-105.

Plan hidrológico de la isla de El Hierro. Consejo Insular de Aguas de Hierro. Decreto 102/2002, de 26 de julio, por el que se aprueba el Plan Hidrológico Insular de El Hierro www.aguaselhierro.org

Walski, D.V.; Chase, D.A.; Savic, W.; Grayman, S.; Beckwith y Koelle, E. (2003). *Advanced Water Distribution Modeling and Management*. Haestad Methods, Waterbury, 2003.

ISBN: 978-84-938046-4-0

SISTEMA DE ALMACENAMIENTO Y REGULACIÓN DE CAUDALES EN LAS GALERIAS MEDIANTE CIERRES CON COMPUERTA EN LOS DIQUES VOLCÁNICOS.

Carlos SOLER LICERAS [1], Miriam HERNÁNDEZ ANDREU[2], Miguel Ángel SICILIA DE PAZ[3]

[1] Área de Aguas del Gobierno de Canarias. carlossolerliceras@gmail.com
[2] Área de Aguas del Gobierno de Canarias. miriamhernandezandreu@gmail.com
[3]Dirección General de Tributos. miguesicilia@gmail.com

RESUMEN

Las galerías de agua canarias son las obras hidráulicas más productivas del archipiélago. En general aportan agua de excelente calidad y exigen muy poco mantenimiento. Solo tienen un inconveniente y es que drenan el acuífero continuamente, aportando los caudales sin ninguna regulación. En esta ponencia se presenta la definición de unas estructuras de cierre de las galerías, basadas en la geología volcánica, que no solo son capaces de regular completamente la salida del agua, además consiguen que el acuífero se convierta en un gigantesco depósito que almacena los caudales que no se extraen, logran convertir un pozo de 52 metros de profundidad en el único artesiano artificial de Canarias, obtienen acuífero donde antes era zona no saturada y pueden lograr devolver los caudales que antaño tuviera el Parque Nacional de La Caldera de Taburiente en la isla de La Palma, como de hecho ya lo han comenzado a conseguir.

Palabras clave: *Regulación galerías, diques volcánicos, cierres.*

ABASTRACT

Canary water galleries are the most productive in the archipelago waterworks. In general provide excellent water quality and require little maintenance. Only one drawback is that drain the aquifer continuously, providing unregulated flows. In this paper the definition of structures close to the galleries, based on volcanic geology, which are not only able to completely regulate the flow of water, plus get the aquifer becomes a gigantic reservoir that stores the flow occurs that are not removed, they manage to make a well 52 meters deep in the only artificial artesian de Canarias, obtained aquifer where it was previously unsaturated zone and can achieve return flows that once had the National Park of La Caldera on the island La Palma, as indeed they have already begun to achieve.

Key words: *water galleries regulation, volcanic dykes, enclosures.*

INTRODUCCIÓN

El objeto de la presente ponencia es el de exponer el diseño de una estructura de

hormigón y acero que permite la completa regulación de los caudales aportados por las galerías. De esta forma y mediante una estructura simple, muchísimo más barata que la construcción de balsas, se consigue solucionar el grave inconveniente que tenían las galerías: la ausencia total de regulación de los caudales extraídos. Hasta el momento actual los tres ingenieros que suscriben, autores del diseño, han ejecutado cuatro de estas estructuras consiguiendo que la extracción de agua pueda ser totalmente nula o llegar a caudales punta que superan los centenares de litros por segundo en una misma galería. Todas las obras que se han realizado mediante este sistema han sido financiadas por el Gobierno de Canarias y por el Ministerio de Obras Públicas, Agricultura o Medio Ambiente.

Las galerías o túneles hidráulicos son las obras de captación que aportan más cantidad y mejor calidad de todas las realizadas en Canarias. Tan solo en Tenerife producen 100 hm^3 al año. Son obras que en ausencia de afecciones, son capaces de mantener el caudal de agua en cantidad y calidad durante decenas de años. El mejor ejemplo de esta última afirmación lo constituyen las casi cien galerías de La Palma que aportan 40 hm^3 al año desde hace ya más de cincuenta años.

El coste de ejecución de una galería es alto. Considerándolo desde el punto de vista de su producción es siempre mayor que un sondeo o un pozo, pero menor que el de una desaladora o una presa, por otro lado, desde el punto de vista de los costes de mantenimiento no hay obra más barata que una galería, siempre que la afección de otras no le obligue a reperforar para mantener los caudales. Si ahora consideramos el coste de producción del agua, de nuevo vuelven a erigirse las galerías en las obras hidráulicas más baratas. Además, las galerías aportan otros beneficios como es la posibilidad de ver el acuífero en su interior observando procesos hidrogeológicos que solo la imaginación podría concebir, o enseñando el interior de las islas y así contribuir como ningún otro medio lo ha hecho al conocimiento geológico de la isla y su proceso de formación. Como puede apreciarse las galerías han sido el mejor invento canario. Únicamente tienen un inconveniente derivado de su propia configuración: drenan el acuífero y lo hacen sin interrupción. Se necesite o no el agua que producen, el caudal fluye desde el interior hacia los puntos de consumo. Este hecho genera un despilfarro del agua y un desperdicio de los caudales. Es esta total falta de regulación la única mancha que puede contraponerse a los beneficios que han aportado las galerías al desarrollo económico y social de Canarias.

Cabe mencionar que el Cabildo de Tenerife proyectó más de una docena de grandes balsas con objeto de captar los caudales de escorrentía que creía que se producían en la isla. Una vez construidas estas balsas, financiadas por el Ministerio en más de tres mil millones de pesetas de los años ochenta, y tras varios años de quedarse secas o aportar muy poco volumen de aguas de escorrentía, se decidió emplear estos grandes depósitos para que almacenasen esos excedentes invernales que las galerías, al no usar el agua y no tener modo de regular su aportación, se vertían todos los años al barranco. De esta forma, la infiltración del agua en Tenerife vino a cubrir las carencias de la escorrentía. Y así el Plan de Balsas de Tenerife pasó de ser un sistema de captación de aguas superficiales a aportar una forma de evitar el desperdicio invernal del agua extraído por las galerías.

Por otra parte, uno de los elementos singulares en la geología de los terrenos volcánicos son los diques. Están constituidos por estructuras bidimensionales intrusivas que, a modo de pantallas verticales que se inician en las cámaras magmáticas, se extienden varios kilómetros a un lado y otro. Aunque algunas veces se pueden observar diques aislados, generalmente se agrupan en familias que comparten un mismo origen y una misma antigüedad, y sensiblemente también, la misma composición y la misma dirección. La composición geológica de los diques es similar a la de las coladas, pudiendo encontrarse en Canarias diques basálticos, traquíticos o fonolíticos. El proceso de formación parte de un conjunto de grietas en el terreno más o menos paralelas, supuestamente generada por un

aumento brusco de presión en la cámara magmática, a continuación o a la vez, se produce la inyección de magma en la grieta rellenándola en toda su extensión. Cuando la actividad magmática cesa, comienza el proceso de enfriamiento. Todo proceso de enfriamiento de los materiales volcánicos genera un proceso de retracción que se traduce en la aparición de grietas en su interior. Pero, así como en las coladas este proceso de fisuración se produce espaciado y con grietas verticales alabeadas abiertas, en los diques volcánicos, debido a que su enfriamiento es más lento y homogéneo -al producirse bajo tierra-, genera la aparición de muchas más fisuras, agrupadas en tres familias de planos perpendiculares entre sí, pero mucho más planas y menos abiertas. Esta disposición de las fisuras, cerradas y dispuestas en tres planos perpendiculares, sumado al proceso natural de la alteración, puede conseguir que los diques sean estructuras con muy baja permeabilidad. Si consideramos ahora que los diques se disponen en grandes extensiones y con grandes profundidades, se concluye en que estas características hidrogeológicas, junto con esa disposición, convierten a los diques en pantallas que separan el acuífero insular pudiendo presentar, a un lado y a otro de un mismo dique, diferencias del nivel de agua de decenas e incluso en algún caso más de una centena de metros. Tal y como se ha dicho, los diques suelen aparecer en familias de varios diques más o menos paralelos, pero no tanto como para que no aparezca uno que, variando ligeramente la dirección, corte a todos los miembros de su familia. Es este el caso de los ejes estructurales, verdaderas paredes que acumulando conos volcánicos dan lugar a las dorsales de las islas y que en profundidad, al acumular los diques producen una sobre elevación del acuífero hasta llegar a cotas que no le correspondían por su recarga, por la infiltración ni por la permeabilidad de sus materiales. Además, en muchas islas y ya fuera de los ejes estructurales, las diferentes familias que presentan distintas direcciones, se entrecruzan formando con estas intersecciones unas estructuras a modo de panal de abejas que generan en profundidad una compartimentación del acuífero y de nuevo logran sobreelevar el acuífero por encima de la cota que le correspondería por recarga y permeabilidad.

Muchas galerías perforadas en este archipiélago cortan diques a lo largo de su trazado. Incluso hay algunas que su dirección es perpendicular a familias de diques, como es el caso de las galerías de Tenerife que se dirigen perpendicularmente hacia las dorsales –ejes estructurales- cortando entonces muchos diques y a medida que lo fueron haciendo comprobaron que los caudales que obtenían se incrementaban de golpe a cada dique que se rompía. Este hecho de incrementarse los caudales de forma brusca con la perforación se conoce en todas las islas en las que se han perforado galerías: Tenerife, El Hierro, La Gomera y La Palma. La figura 1 muestra el gráfico perforación-caudal de la galería Ipalán en La Gomera, proyectada y dirigida por los ingenieros que suscriben y en el que se puede comprobar los incrementos de caudal que se producían al perforar los diques.

DESCRIPCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE CIERRE DE UNA GALERÍA

La estructura de cierre de una galería consiste en esencia en una estructura de hormigón que sirve de marco a una compuerta de acero. Aunque la definición es simple, la construcción debe asumir ciertos requisitos cuyo cabal cumplimiento dará el resultado esperado: una completa regulación de los caudales drenados por la galería, de cero a el desagüe brusco y total del depósito de agua formado por el volumen de galería que queda tras el cierre, más el vaciado súbito del acuífero que queda por encima de la traza de la galería. Los requisitos que se deben cumplir para una buena ejecución son los siguientes:

Primero. Localización de un dique volcánico

Hay que comenzar definiendo un dique que la galería haya perforado dentro de la zona

saturada y que presente una permeabilidad baja. Para escoger el dique debe realizarse un seguimiento total de la perforación de la galería en cuanto se intercepta el acuífero, a la vez que se afora el caudal que va aportando. Gracias a la elaboración de un gráfico así similar al expuesto en la figura 1, se puede escoger y decidir cuál es el dique más idóneo.

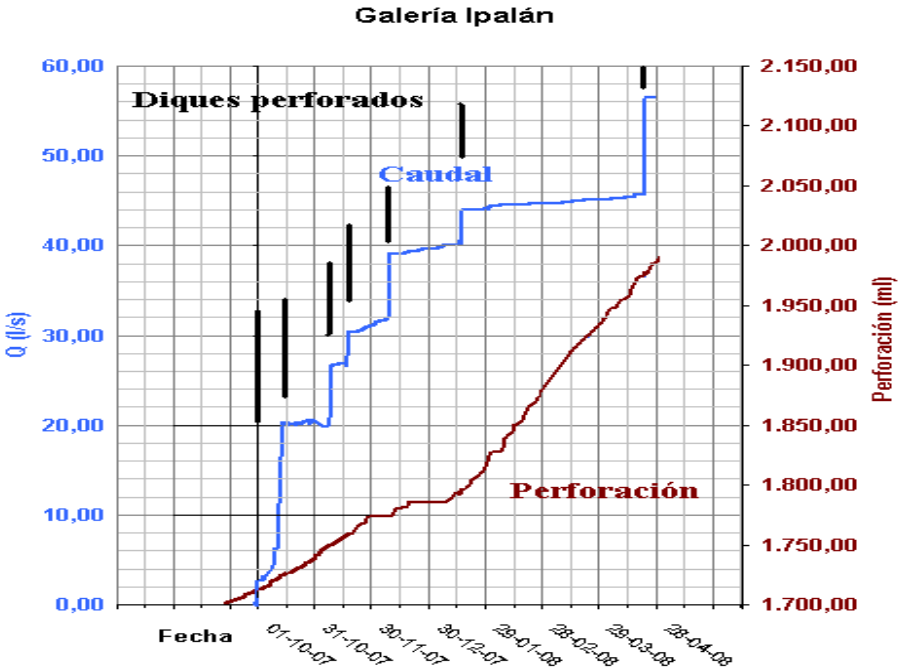


Figura 1: Gráfico perforación caudal en la galería Ipalán en La Gomera. Se aprecian los incrementos de caudal bruscos con la perforación de los diques

Por experiencia en los cierres realizados, cabe decir que esta estanqueidad que se busca es independiente de la petrología que forma el dique e incluso del espesor que presente. Otra de las cuestiones a considerar es la situación del dique dentro de la zona saturada, puesto que la estructura que se ejecute será capaz de regular el aporte del caudal de aguas que proporciona el tramo de galería situado aguas arriba del cierre, quedando entonces sin regular las aportaciones que se originen aguas abajo del cierre. Y también cabe decir que cuando se proyecta una obra así hay que considerar que el número de diques volcánicos aumentan con la disminución de cota a la que se perfore la galería. De esta forma el reconocimiento de superficie de la galería de Valle Gran Rey en La Gomera (cota 125) dio cuatro diques y ya se habían perforado dieciocho antes de llegar a la zona saturada. La galería de Ipalán (cota 200) mostraba 8 diques en superficie y cuando se perforó se atravesaron 42. La galería de fondo del pozo de Los Padrones en la isla de El Hierro (cota 0) mostraba en superficie 6 diques mientras que al final de sus mil metros de perforación se atravesaron 40 diques (Figura 2).

Segundo. Estructura del cierre: el marco

La construcción de la estructura del cierre se compone de dos partes: el marco y la compuerta. El primero es una obra de hormigón que lleva embebido un cerco de acero al que están soldados los pernos que anclan el marco al terreno. El cerco se define de tal forma que permita el paso de todos los vehículos y maquinaria. El gálibo se define así para que el cierre no limite la posibilidad de que un día se pueda reperforar la galería sin tener que demoler el cierre. Este cerco está hecho de perfiles IPN formando marcos rectangulares separados un metro. Únicamente el perfil situado más aguas arriba, el que realmente es el marco, se construirá con un perfil UPN con el hueco mirando hacia aguas arriba para poder

así encajar con la compuerta. Todos los cercos a su vez están unidos entre si mediante soldadura con los mismos perfiles y cada uno de los marcos aglutina un número de pernos que anclan la estructura a la roca de caja. Los pernos se colocan para que asuman el esfuerzo cortante que se va a producir cuando el agua empuje sobre la compuerta y esta lo haga sobre el marco. Por tanto se tienen que calcular de tal forma que su sección total multiplicada por la resistencia característica del acero sea igual al cortante minorado con el coeficiente de seguridad correspondiente. El marco se hace con la misma sección de la galería, únicamente incrementado en la solera, normalmente con un metro de excavación en profundidad, para lograr que la sección de hormigón de la solera no genere un escalón en el marco.

Figura 2: Pozo de Los Padrones. A la izquierda se muestra un plano en planta del trazado de la galería de fondo. En él se ven todos los diques volcánicos atravesados y con colores diferentes los compartimentos que se han conseguido al hacer los cuatro cierres. A la derecha un perfil de esta misma obra merecedora del Premio Agustín de Betancourt a la Mejor Obra Civil, en donde se indican los cierres y las alturas de agua conseguidas.

En el marco hay que dejar colocados varios tubos pasantes. En primer lugar una tubería pasante por cada cierre que se haga en el interior de la galería aguas arriba del que se construye, más uno más para que sirva de tubería de vaciado al depósito que originará el propio cierre que se define. Una tubería pasante para albergar la ventilación de la galería el día que haya que retomar la perforación. Por último un tubo de poco diámetro con una válvula aguas abajo para evacuar el aire durante el llenado de la galería y después para controlar la presión de agua que se origina tras el cierre y que nos dirá la columna de agua que se alcanza. Conviene también dejar una serie de tubos de poco diámetro que colocados en la cara de aguas abajo del cierre lleguen hasta el dique. Estos tubos sirven de esperas para que una vez hormigonado el cierre, se pueda introducir por ellos la broca de perforación y perforar uno o dos metros el dique. Además permiten la posterior inyección de agua y cemento que se explicará más adelante (Figura 3).

Una vez colocados todos los marcos, las esperas y el encofrado, se procede a hormigonar que siempre es aconsejable realizarlo sin paradas para evitar juntas de hormigonado que luego pueden dar lugar a fugas.

Tercero. Estructura del cierre: la compuerta

La compuerta se realiza con perfiles IPN soldados entre si por las alas formando una placa que debe calcularse para resistir el esfuerzo del agua. La compuerta está unida al marco mediante dos bisagras de tetón, cuyos dos machos se colocan soldados sobre el último cerco de aguas arriba del marco. Las hembras se colocan soldadas en la compuerta. A su vez esta placa lleva a lo largo de todo el perímetro un perfil IPN soldado por la base

contra la placa. Este perfil deberá entrar en el perfil UPN del marco, ya mencionado y que es el último de aguas arriba, donde encajará y cuya estanqueidad se logrará mediante la colocación de una banda de neopreno de un centímetro a lo largo de todo el contacto entre ambos perfiles. La mayor compuerta que se ha hecho para un cierre fue la de la galería de Ipalán de 4,00 x 4,00 metros de sección y capaz de resistir una columna de agua de cien metros (Figuras 4).

Fig 3: Vista aguas abajo de la estructura del marco con los cercos, los anclajes y los tubos pasantes de inyección y el de desagüe del cierre (Galería de Ipalán en La Gomera). Derecha vista aguas arriba de la estructura de los cercos con el perfil UPN en primer lugar que es donde encajará la compuerta y donde debe colocarse la banda de neopreno.

Fig 4: Compuerta realzadas en la Galería de Ipalán una vez hormigonadas las secciones. A la izquierda vista aguas abajo del cierre una vez hormigonado y mostrando las caras externas de los cercos y el gálibo necesario para el paso de maquinaria. A la derecha vista aguas arriba del mismo cierre donde se observa la compuerta de cinco toneladas con el perfil IPN que encastra en el perfil UPN y una tubería pasante.

Cuarto. Impermeabilización de la estructura del cierre

Tres son los puntos concretos del cierre en los que se pueden producir filtraciones que disminuyan su eficacia y que anulen o aminoren la capacidad de regulación del sistema. Estos tres puntos son la compuerta, el marco y el contacto hormigón-dique.

El primero es el más fácil ejecutarlo estanco ya que consta de perfiles de hierro soldados y si esta soldadura se realiza bien y a lo largo de toda la línea de contacto el éxito es fácil obtenerlo. Otra cosa es el contacto entre la compuerta y el cerco del marco. Esta parte, como ya se ha expuesto, consta de un perfil IPN que encaja en el cerco formado por un perfil UPN. En la zona de contacto, su impermeabilización, se recurre a una banda de neopreno de un centímetro de espesor. Este método ha dado buenos resultados y lo único que cabe hacer constar es la necesaria reposición del neopreno cada vez que se abra la compuerta. La impermeabilidad del marco de hormigón reside en su proceso de hormigonado. Como ya se ha dicho, por ello debe hacerse sin parada. La impermeabilización del tercer punto, el contacto entre el marco y el terreno, es la más compleja y la que requiere de especialistas. Esta impermeabilización se realiza mediante la inyección de agua y cemento en dosificaciones y presiones, consiguiendo excelentes resultados. Para ello y después de fraguado el hormigón del marco, a través de las esperas de inyección dejadas en la estructura, se perfora la zona del contacto llevando el taladro cinco metros en el interior del dique. A medida que se van reperforando estos taladros se van inyectando aprovechando la misma boca del tubo de espera para enroscar la tubería de inyección. La inyección debe iniciarse a dosificaciones y presiones bajas, para luego ir subiendo esta última hasta llegar a la presión de servicio estipulada multiplicada por un coeficiente de seguridad. La dosificación debe mantenerse baja puesto que se busca que la lechada corra por el contacto y sobre todo por las fisuras que la excavación de la galería haya podido provocar en el dique. En el caso de que con esas dosificaciones bajas no se alcance la presión de servicio o tengamos fugas difíciles de controlar, se aumentará la dosificación pero siempre manteniéndola lo más baja posible y regresando a dosificaciones bajas en cuanto se pueda.

Quinto. Parafernalia

Bajo este nombre se denomina a toda la estructura que es necesaria colocar aguas abajo del primer cierre y que debe asumir todas las tuberías de todos los cierres que se hayan construido en la galería. Por ejemplo en el caso de la galería de fondo del pozo de Los Padrones (El Hierro), la parafernalia asumía las tuberías y válvulas de tres cierres y una tubería más que procedía del último dique que quedó sin perforar en el frente de la galería. En total en la parafernalia debe haber una tubería y una válvula por cada cierre que se deben unir a una sola tubería, a modo de colector general, en la que hay que colocar otra válvula, que es la encargada de extraer los caudales de la captación, permitiendo fácilmente la extracción desde el compartimento que se desee. El sistema de válvulas se puede automatizar con lo que el control del sistema se coloca en la boca de la galería.

CONCLUSIÓN

Una vez que en la década de los años noventa del pasado siglo se hicieran los primeros cierres basados en las estructuras descritas -Pozo Los Padrones, El Hierro- el modelo de regulación a base de cierres en los diques se imitó por la iniciativa pública y privada en el Túnel de Trasvase y en las galerías que los Heredamientos de Las Haciendas de Argual y Tazacorte tienen en el interior de La Caldera de Taburiente.

En ambos casos, nueve cierres en total, no se ejecutaron con las prescripciones y detalles señalados en esta ponencia, debido al desconocimiento que tenían para ejecutar estas estructuras. Ello repercutió en que los cierres fueran mal situados en unos casos y mal impermeabilizados en la mayoría. Aún así, se han obtenido buenos resultados en la regulación de los caudales en el caso de las galerías de Las Haciendas, aunque las grandes

presiones registradas por detrás de los cierres, que en ocasiones han superado el centenar de metros, obligaron a abrir válvulas para aliviar las presiones. En el caso del Túnel de Trasvase, ni la Dirección de Obra ni el contratista supieron realizar los cierres y hoy en día, aunque algo regulan, la cantidad de agua que se escapa en los dos cierres junto con la inexistencia de galería por detrás del cierre, ha provocado que la efectividad de estas estructuras haya quedado reducida a tan solo una muestra que señala lo que podría haberse logrado si se hubieran colocado los cierres en el lugar adecuado y se hubieran realizado tal y como se describe en esta ponencia.

En cualquier caso, los cierres en las galerías que la iniciativa privada de La Palma ha construido imitando la técnica descrita, ha logrado que parte de los caudales de los nacientes se haya recuperado, que los caudales de las propias galerías hayan aumentado, que se haya desperdiciado menos agua y que los nacientes de Marcos y Cordero hayan aumentado de caudal. Cabe señalar que dentro del Avance del Plan Hidrológico de La Palma se propuso esta solución descrita que, gracias a estas estructuras, lograría devolver los caudales a los nacientes de la isla, tanto los del interior de La Caldera de Taburiente como los exteriores, que en el caso de Marcos y Cordero son los de mayor caudal y mejor calidad del archipiélago. El cierre de las siete galerías de Las Haciendas que se ha comentado, realizados quince años después que el APHI de La Palma lo propusiera para devolver el caudal de los manantiales, ha evidenciado que esta solución es factible y que los nacientes de La Caldera, a solo que cerraran las cuatro galerías externas que drenan el acuífero COEBRA, volverían a presentar los caudales que hace cien años tenían.

Por último, las estructuras de cierre de las galerías realizadas por los ingenieros que suscriben, autores de su diseño, han conseguido almacenar los excedentes invernales en el acuífero, convirtiendo a éste en un depósito regulador. Incluso en el caso de la Galería de fondo del Pozo de Los Padrones, el especial diseño con cuatro de estas estructuras de cierre, permite trasvasar agua de un compartimento a otro consiguiendo acuífero donde antes era zona no saturada. Asimismo y gracias a los cierres reguladores, esta misma obra ha conseguido ser el primer pozo artesiano de Canarias, un pozo costero de 52 metros de profundidad en el que una parte de su caudal se extrae sin bombear.

ISBN: 978-84-938046-4-0

RETOS EN LA GESTIÓN DEL AGUA EN LA MACARONESIA

Juan C. SANTAMARTA[1], Inés RUIZ-ROSA[2], Jose C. FONTES[3], Francisco C. RODRIGUES[4]

[1]Universidad de La Laguna, Área de Ingeniería Agroforestal, Tenerife. jcsanta@ull.es
[2]Universidad de La Laguna, Departamento de Análisis Económico, Economía Financiera y Contabilidad. ciruiz@ull.es
[3]Universidade dos Açores, Departamento de Ciências Agrárias, 9700 Angra do Heroísmo. jfontes@uac.pt
[4]Universidade dos Açores, Departamento de Ciências Agrárias, 9700 Angra do Heroísmo. cota@uac.pt

RESUMEN

La región de la Macaronesia presenta notables diferencias en relación a la disponibilidad y gestión de los recursos hídricos, conformando dos realidades diferentes. Por un lado, están los archipiélagos de Azores y Madeira, con gran cantidad de recursos, sin tener que recurrir a la producción industrial de agua y con una gestión pública de los mismos. En la parte central, la situación es diferente, por un lado están las Islas Canarias, con una disponibilidad del recurso hídrico que va aumentando desde las islas orientales hasta las occidentales, con algunos casos de gestión hidráulica singular. Finalmente, Cabo Verde con una disponibilidad muy limitada, similar a las islas orientales de Canarias. Tanto en Canarias como en Cabo Verde, la producción industrial de agua y la reutilización está tomando una importancia cada vez mayor en la dotación de recursos hídricos a la población. El presente trabajo reflexiona sobre las singularidades que modelan la gestión del agua en la Macaronesia con el fin de hacer propuestas, sobre las líneas de trabajo que se deben desarrollar, a la hora de racionalizar el consumo de recursos hídricos en este entorno.

Palabras clave: *Gestión del agua, Economía, Recursos Hídricos, Macaronesia*

ABSTRACT

The region of Macaronesia has considerable differences regarding availability and management of water resources, forming two different realities. First, the archipelago of the Azores and Madeira are plenty of water resources, without desalination plans, and public management thereof. In the central part, the situation is different; on one side are the Canary Islands, which availability of water resources increases from the eastern to the western islands, with some cases of unique water management techniques. Finally, Cape Verde presents very limited water resources availability, similar to the eastern Canary Islands. Both the Canary Islands and Cape Verde, water desalination and water reuse, are taking a growing importance in the supply of water to the population. This paper discusses: the singularities of the management and planning of water in Macaronesia region, focus on groundwater resources, water demand and economic aspects in the supply and water use variables.

Key words: *Water management, Economics, Water Resources, Macaronesia.*

1. INTRODUCCIÓN

Los archipiélagos que configuran la región conocida como *Macaronesia* comparten una serie de aspectos naturales, geológicos y climatológicos que le otorgan una entidad biogeográfica propia. Estas peculiaridades hacen que la gestión eficiente de sus recursos hídricos se haya convertido en una de las principales líneas de acción en estas comunidades.

A medida que las exigencias hídricas han ido aumentando en estas áreas la noción de lo que se entiende por recurso también se ha visto modificada. De esta forma el constante crecimiento de la población, con el consiguiente incremento de los requerimientos hidrológicos, ha provocado, además, la búsqueda de fuentes alternativas de producción de agua. Entre estos procesos hay que mencionar, por un lado las técnicas de desalación de agua de mar, y por otro las que permiten reutilizar el agua residual, sobre todo para el riego agrícola, una vez depurada.

En este trabajo trataremos de reflexionar sobre cómo las singularidades que caracterizan a este ámbito geográfico afectan a la gestión del agua, tanto desde el punto de vista de la oferta como de la demanda, poniendo especial atención en las ventajas e inconvenientes de los sistemas no convencionales de producción de agua, para terminar aportando una serie de líneas de acción que los autores consideran interesante potenciar.

2. ESPECIFICIDADES HIDROLÓGICAS DE LA REGIÓN MACARONÉSICA

Macaronesia es el nombre que reciben un conjunto de cinco archipiélagos, situados en el Atlántico Norte, junto a Europa y el norte de África. Estos archipiélagos son (Figura 1):

i. *Azores:* Compuesto por nueve islas portuguesas ubicadas a 1.200 km. de Lisboa. Las nueve islas están divididas en tres grupos; el grupo oriental de Sao Miguel y Santa María, el grupo central de Terceira, Graciosa, Sao Jorge, Pico y Faial y el grupo occidental de Flores y Corvo.

ii. *Madeira:* Que consta de dos islas habitadas (Madeira y Porto Santo) y tres islas menores no habitadas llamadas Desertas.

iii. *Islas Salvajes:* Conjunto de islas compuestas por tres islas principales (Isla Mayor o Salvaje Grande, Pitón Grande y Pitón Pequeña) y varios islotes. Estas islas junto con las de Madeira forman la Região Autónoma de Madeira, región autónoma portuguesa.

iv. *Canarias:* Archipiélago atlántico norteafricano que constituye, además, una de las comunidades autónomas de España. Está compuesto por siete islas; El Hierro, La Gomera, La Palma y Tenerife, que forman la provincia de Santa Cruz de Tenerife, y Gran Canaria, Fuerteventura y Lanzarote, que constituyen la provincia de Las Palmas, además de seis islotes (Alegranza, Isla de Lobos, La Graciosa, Montaña Clara, Roque del Este y Roque del Oeste, todos ellos pertenecientes a la provincia de Las Palmas.

v. *Cabo Verde:* Este archipiélago, formado por diez islas grandes y cinco menores, constituye la República de Cabo Verde.

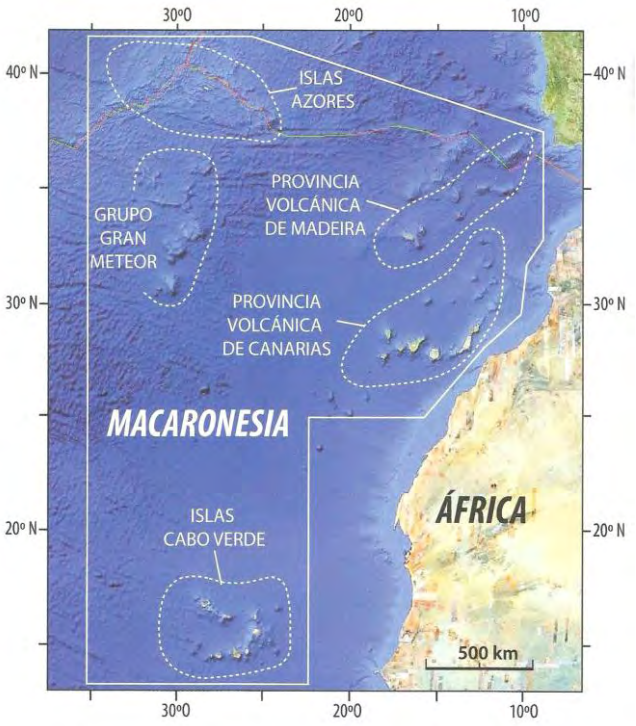


Figura 1. La región de la *Macaronesia* (Carracedo, 2011)

En los sistemas insulares las características hidrológicas vienen definidas, entre otros, por los siguientes condicionantes (Santamarta, 2013):

i. Clima.
ii. Morfología y altitud media de las islas.
iii. Geología.
iv. Edad de los materiales que conforman las islas.
v. Hidrogeología.
vi. Tipos de suelos.
vii. Tipo de cubierta forestal y vegetal, porcentaje de fracción cabida cubierta (fcc).
viii. Territorio ocupado por los habitantes, urbanización.
ix. Usos del suelo (agricultura).

Por otro lado, y desde el punto de vista hidrológico, los espacios insulares comparten una serie de características comunes que, en general, se pueden resumir en los siguientes apartados (Santamarta, 2013):

i. Recursos hídricos superficiales escasos en general.
ii. Recursos hídricos subterráneos sobreexplotados, minería del agua fósil, captación de aguas con exceso de flúor.
iii. Fenómenos de intrusión marina.
iv. Sobrepoblación.
v. Poblaciones concentradas en la zona de costa.
vi. Cultivos agrícolas intensivos, con gran demanda de recursos hídricos.
vii. Turismo estacional masivo, a excepción de Canarias que se caracteriza por ser un destino turístico con ausencia de estacionalidad, puesto que recibe una gran cantidad de visitantes a lo largo de todo el año, aproximadamente 10 millones, lo que supone una elevada demanda de recursos hídricos
viii. Contaminación importante, de algunas zonas de los acuíferos insulares,

principalmente por nitratos e intrusión marina.

ix. Necesidad de tomar la isla en su conjunto como una unidad hidrológica, no por cuencas como en el caso continental.

x. Aunque en Canarias existe una red EMA con datos disponibles en la red, existe dificultad, en algunos sistemas insulares, para disponer de datos fiables de las variables hidrometerológicas. Existencia de microclimas.

xi. Dependencia energética del ciclo hidrológico insular (binomio agua-energía). En algunos casos dependencia total de la desalación de agua de mar para satisfacer la demanda, como es el caso de Lanzarote, Cabo Verde…

xii. Ausencia de cursos continuos de agua, en general salvo casos puntuales, como Azores, debido a su mayor pluviometría, en algunos casos superior a 2.000 mm por año (Marzol *et al*, 2005).

A lo anterior hay que añadir que la cantidad y variación de las precipitaciones en el tiempo juega un papel fundamental en lo que a disponibilidad de recurso hídrico se refiere. Por otro lado, la morfología de las islas es otro de los aspectos que también puede influir en la escorrentía, siendo menor en las islas más planas y de menor altitud. Precisamente, en las islas más altas, unido a la presencia de vientos alisios, hace que se produzca otro tipo de precipitación, de tipo convectiva, que en Canarias es conocida como la precipitación de niebla o lluvia horizontal, con un efecto, —discutido actualmente por la literatura científica—, importante en la infiltración y en la recarga de los acuíferos (Santamarta, 2013).

Por último, la hidrogeología de un territorio influye en la distribución, cantidad y calidad de los recursos subterráneos. Estos recursos se ven favorecidos por la permeabilidad innata inicial que poseen algunos materiales volcánicos (Cabrera & Custodio, 2013), como es el caso que caracteriza a la zona objeto de estudio. Esto también se ve reflejado en la existencia o no de barrancos provocados por la escorrentía del agua y la erosión hídrica que posteriormente generan el desmantelamiento de la isla. No disponer de estos cursos de agua en forma de barrancos a lo largo de la geografía de la isla sugiere una mayor infiltración en el terreno y por tanto mayor disponibilidad de agua, que podrá ser aprovechada mediante las técnicas al uso (galerías, pozos y sondeos).

Por lo tanto, para poder acometer un aprovechamiento hidráulico en una isla volcánica es fundamental conocer la geología y el proceso de formación de la isla, ya que esta última, condiciona notablemente los diferentes aprovechamientos de los recursos hídricos que se pueden llevar a cabo. En este sentido los recursos hídricos, se deben gestionar atendiendo a las singularidades que presentan los sistemas insulares volcánicos, esto puede suponer que en ocasiones las estrategias y metodologías utilizadas en terrenos continentales no sean válidas para espacios limitados y heterogéneos como es el caso de las islas macaronésicas.

3. GESTIÓN DE LA DEMANDA Y DE LA OFERTA

Una gestión racional del agua puede dirigir sus esfuerzos hacia la demanda y/o hacia la oferta. El concepto de gestión de la demanda de agua “comprende el conjunto de actividades que permiten reducir la demanda de agua, mejorar la eficiencia en el uso y evitar el deterioro de los recursos hidráulicos” (Estevan, 2000), sin embargo la gestión de la oferta se centra, fundamentalmente, en la planificación de la producción de agua. Para Estevan y Naredo (2004) “el principal problema actual no reside ya en promover nuevas obras de oferta con las que seguir alimentando usos inadecuados y despilfarradores del agua, sino en deshacer buena parte del camino erróneamente andado, recreando una cultura que ayude a aceptar el agua verdaderamente disponible en nuestro territorio y a gestionarla en régimen

de escasez apoyada ahora, no tanto en limitaciones físicas, como en consideraciones económicas, sociales y ecológicas".

Dentro de las acciones relacionadas con la gestión de la demanda podríamos distinguir cuatro frentes de acción: infraestructura, ahorro, eficiencia y sustitución.

Las tareas que se incluyen en los programas de infraestructuras se centran básicamente en la reparación de redes y eliminación de fugas, la localización y eliminación de tomas ilegales, la universalización de contadores individuales, la reducción de presiones de suministros y la gestión informatizada de redes. En cuanto a los programas de ahorro, sus acciones son de dos tipos, por un lado, las que tratan de estimular el ahorro voluntario de agua reforzando la conciencia ciudadana, y por otro, los que actúan sobre las tarifas de agua para disuadir el despilfarro. Los programas de eficiencia van dirigidos a promover la reducción del consumo de este recurso mediante la incorporación de modificaciones técnicas en los equipos y dispositivos de consumo. Aunque su campo de actuación es muy variado, podemos reconocer tres grandes centros de interés: doméstico, industrial y comercial y de exterior[1]. Por último, a través de los programas de sustitución se pretende fomentar la utilización de agua que, tradicionalmente no se consideraba como opción, para ciertos usos, evitando de esta forma el consumo de agua blanca.

Viñuales (2004) atribuye el éxito de una gestión eficiente del agua a la creación de un nuevo contexto situacional en el que convivan ahorro y planificación óptima de la oferta.

En este sentido el Instituto Tecnológico de Canarias, S.A. publicó en mayo del 2005 (Betancort et al., 2005), como resultado del proyecto Aquamac una serie recomendaciones para promover la gestión sostenible del agua en la Macaronesia (Tab.1).

Tabla 1: Recomendaciones para la gestión eficiente del agua en la Macaronesia

Acción	**Gestión**	**Programa**
Integración de dispositivos eficientes de consumo en la edificación	Demanda	Eficiencia
Instalación de medición y control en puntos de consumo	Demanda	Infraestructura
Captación, almacenamiento y utilización de aguas pluviales	Oferta	
Reutilización de aguas grises	Demanda	Sustitución
Promoción de jardinería de bajos requerimientos hídricos	Demanda	Eficiencia
Uso de materiales apropiados en las redes hidráulicas de abastecimiento	Demanda	Eficiencia

Fuente: Elaboración propia a partir de Betancort et al. (2005)

Del análisis de estas recomendaciones se puede observar como la mayor parte de ellas se centran en acciones relacionadas con la gestión de la demanda, dentro de los programa de eficiencia.

4. ALTERNATIVAS INDUSTRIALES DE PRODUCCIÓN DE AGUA

En el espacio geográfico analizado, los sistemas convencionales de captación de agua presentan, fundamentalmente, dos tipos de limitaciones: unas naturales, y que se deben a una disminución en el rendimiento de las explotaciones subterráneas producidas por un desequilibrio entre la extracción de agua y la recarga natural, y otras de carácter económico, puesto que la disminución sistemática de la rentabilidad de los aprovechamientos, según la

[1] Jardinería, fundamentalmente.

relación cantidad-calidad de agua extraída, tiene como consecuencia directa un aumento del precio del agua de abastecimiento.

Frente a los problemas asociados a los métodos convencionales de obtención de agua áreas geográficas con circunstancias climáticas y geográficas adversas obliga a recurrir a los sistemas no tradicionales con el fin de solucionar esta problemática hídrica.

Con respecto a estos sistemas no convencionales de obtención de agua, Rico et al. (1998) reconocen que "en determinados espacios regionales con escasez de recursos y demandas crecientes, estas aguas deberían adquirir condición de recursos estratégicos que, en función de la aceptación cultural de su uso y la implantación de sistemas de gestión integral, permitieran aliviar la explotación que sufren las fuentes tradicionales. Se constituyen así en garantes de un desarrollo socioeconómico sostenible y armónico con el medio natural, preservando los recursos renovables y el equilibrio hídrico".

Nos encontramos, de esta forma, con dos alternativas industriales de producción de agua, a las que se van dedicando, poco a poco mayores esfuerzos, tanto económicos como humanos, y sobre las que se han depositado grandes expectativas de cara al futuro: la desalación y la reutilización.

Concretamente en islas en las que por la escasa aportación de precipitaciones, entre 100 y 250 mm/año, no tienen la suficiente recarga de sus acuíferos como para satisfacer la demanda del recurso se tiene que recurrir a la producción industrial de agua, mediante plantas desaladoras.

Sin embargo, y a pesar de los indiscutibles beneficios que supone este sistema de producción de agua, lleva aparejado una serie de efectos medioambientales negativos que hay que considerar; por un lado el elevado consumo energético y, por otro el vertido de salmuera. En lo que respecta al primer aspecto reconocemos que, aunque se ha conseguido avanzar bastante en lo que a consumo energético se refiere, el empleo de energía para este proceso resulta aún bastante relevante, llegando a suponer hasta casi un 43 % del coste total de este proceso (Fariña, 2005).

Esto implica una dependencia energética para la producción de agua y un consumo elevado de recursos económicos que algunos estados insulares no pueden asumir. Asumiendo que la producción energética en las islas oceánicas, implica unos costes, cuatro veces superior, en comparación, con los costes del continente (península Ibérica) donde el coste ronda los 50 € MWh (Megawatio-hora), depender exclusivamente de la producción de recurso hídrico por este medio, puede ser a la larga insostenible, por lo que, es necesario investigar en nuevas fuentes donde sea posible, o bien, sistemas de desalación por energías renovables, geotermia, solar, eólica.

En esta línea, autores como Aguilera, Pérez y Sánchez (2003) consideran que ante la posibilidad de utilizar la desalación como alternativa a la falta de disponibilidad de agua resultaría menos costoso, hablando en términos ecológicos, llevar a cabo una mejor gestión de la demanda de agua puesto que es más barato ahorrar un m^3 que producirlo.

Además del consumo energético, el vertido de la salmuera resultante de la desalación es otro de los graves inconvenientes de este sistema de producción de agua. Concretamente las emisiones de salmuera, junto con otra serie de factores, afectan a las praderas de *Cymodocea nodosa* (Afonso-Carrillo & Gil, 1980) debido al incremento de la turbidez del agua, aumento de las condiciones de salinidad y sobresedimentación (Ruiz et al., 2009)

A diferencia de los sistemas anteriores, la depuración de aguas residuales no es una

opción sino una obligación legal. Las plantas depuradoras de aguas residuales tienen como objetivo, a través de una serie de procesos que en definitiva pretenden imitar a la naturaleza, devolverle al agua las condiciones que tenía antes de ser usada con el fin de que regrese al entorno en condiciones óptimas y evitar, de esta forma, posibles deterioros medioambientales.

Unas exigencias medioambientales cada vez más estrictas en cuanto al tratamiento de aguas residuales, unido a la posibilidad patente de aprovechar el agua regenerada, han hecho centrar los esfuerzos en el tratamiento de las aguas residuales con el objeto de ampliar sus opciones de uso.

Obviamente el proceso de depuración se desarrolla con el objetivo de minimizar el impacto ambiental que el vertido de aguas residuales puede provocar en su entorno, por lo que no cabe duda que depurar no debe ser una opción sino una obligación. Sin embargo, la ejecución de este proceso también lleva aparejado una serie de impactos ambientales negativos. Entre estos efectos Fornás y Colomer (2008) identifican posibles impactos sobre el hábitat, la vegetación, el paisaje y los espacios protegidos, los olores y ruidos generados y la gestión de lodos.

5. Conclusiones

Sin duda las peculiaridades que existen en el espacio geográfico de la *Macaronesia* son una oportunidad para desarrollar propuestas de gestión hidrológica coordinada y adaptada a las especificidades de este entorno.

En este sentido el desarrollo de este trabajo evidencia la necesidad de centrar el estudio de la gestión hidrológica de los archipiélagos de la *Macaronesia* en potenciar la gestión eficiente de la demanda fundamentalmente, y la producción industrial de agua.

En lo que a gestión de la demanda se refiere los esfuerzos deben ir dirigidos hacia los programas de eficiencia, esto supone entre otras cosas la implantación de dispositivos eficientes y el diseño de jardines adaptados a condiciones de escasez hídrica, aspectos fundamentales en zonas de alto atractivo turístico como es el caso de algunas de las islas que configuran este espacio.

En este sentido se propone cuantificar el consumo de agua antes y después de implantar estas medidas y evaluar sus efectos, tanto a nivel técnico como económico, y calcular indicadores que permitan obtener el retorno de la inversión.

Por otro lado, y a la hora de seleccionar la mejor alternativa hidrológica en lo que a producción industrial se refiere, se debería, en primer lugar, estudiar las especificidades del entorno que se está analizando y, en segundo lugar, sopesar las ventajas e inconvenientes tanto técnicas, como económicas y sociales, de implantar cada una de ellas.

En este sentido, y dentro de los sistemas de producción industrial de agua, se propone poner en marcha campañas de fomento de regeneración y reutilización de aguas residuales con el fin de potenciar el ahorro de agua blanca, como alternativa prioritaria frente a la desalación para espacios para los que esta alternativa es prescindible.

REFERENCIAS

Afonso-Carrillo, J. y Gil Rodríguez, M.C. (1980). *Cymodocea nodosa (Ucria) Ascherson*

(Zannichelliaceae) y las praderas submarinas o sebadales en el Archipiélago Canario. Vieraea, Vol. 8, nº 2, p. 365-376.

Aguilera Klink, F., Pérez Moriana, E. y Sánchez García, J. (2003). *El agua en Tenerife: procesos sociales, valores e intereses.* III Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación del agua, celebrado en Sevilla del 13 al 17 de noviembre de 2003.

Betancort, J, Peñate, B, Martel, G, y Berriel A. (2005). *Propuesta de recomendaciones normativas para promover la gestión sostenible del agua en la Macaronesia*. Proyecto Aquamac. Instituto Tecnológico de Canarias, S.A.

Carracedo, J. C. (2011). *Geología de Canarias I: Origen, Evolución , Edad y Volcanismo*. Ed. Rueda. Madrid.

Cabrera, M.C., Custodio, E., (2013). *Hidrología y terrenos volcánicos*, en *Hidrología y Recursos Hídricos en Islas y Terrenos Volcánicos*, Colegio de Ingenieros de Montes: Madrid. 556 pp.

Estevan, A y Naredo, J.M. (2004*). Ideas y propuestas para una nueva política del agua en España*. Editado por Bakeaz y Fundación Nueva Cultura del Agua, Bilbao.

Estevan, A. (2000): "Planes integrales de gestión de la demanda de agua", en ESTEVAN, A. Y COMUÑAS, V. (coord.), *La eficiencia del agua en las ciudades.* Editado por Bakeaz y Fundación Ecología y Desarrollo, Bilbao.

Fariña.M. (2005): El coste del agua producida por las grandes desaladoras de agua de mar en España. IT, Nº 72, PP.62 - 67

Fornás Collado, V. y Colomer Mendoza, F. J. (2008): "Las declaraciones de impacto ambiental en estaciones depuradoras de aguas residuales". Tecno ambiente: revista profesional de tecnología y equipamiento de ingeniería ambiental (2008), año 18, no. 189, 23-32

Marzol, M. V.; Yanes, A.; Romero, C.; Brito De Azevedo, E.; Prada, S.; Martins, A. (2005). Los riesgos de las lluvias torrenciales de la Macaronesia (Azores, Madeira, Canarias y Cabo Verde). Publicaciones de la Asociación Española de Climatología (AEC). Serie A, nº5.

Rico Amorós, A.M., Paños Callado, V., Olcina Cantos, J. y Baños Castiñeira, C. (1998). *Depuración, desalación y reutilización de aguas en España*, editado por Oikos-Tau, S.L., Barcelona.

Ruiz, J.M., Marín-Guirao, L., Sandoval-Gil, J.M., 2009. Responses of the Mediterranean seagrass Posidonia oceánica to in situ salinity increase. Botanica Marina 52, 459-470.

Santamarta J.C. et al. (2013). *Hidrología y Recursos Hídricos en Islas y Terrenos Volcánicos*, Colegio de Ingenieros de Montes: Madrid. 556 pp.

Viñuales Edo, V. (2004): "La eficiencia en el uso del agua en la ciudad: algunas enseñanzas de las ciudades ahorradoras", trabajo presentado en el *IV Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación del Agua,* celebrado en Tortosa del 8 al 12 de diciembre de 2004.

ISBN: 978-84-938046-4-0

IDEAS PRECONCEBIDAS SOBRE EL CICLO DEL AGUA Y LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA EDUCACIÓN SECUNDARIA DE CANARIAS

Ana Isabel SANTANA ARMAS[1], María del Carmen CABRERA[1] y Francisco José PÉREZ-TORRADO[1]

[1] Departamento de Física (GEOVOL). Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, España. ana.cienciasdelmar@gmail.com; mcarmen.cabrera@ulpgc.es; franciscojose.perez@ulpgc.es

RESUMEN

El ciclo del agua es uno de los procesos terrestres más estudiados y menos comprendidos en profundidad por los estudiantes de primaria y secundaria, que no son capaces de aplicar lo estudiado a la vida cotidiana. Esta realidad se traslada también a la sociedad, como se refleja en los medios de comunicación, en un área donde la escasez hídrica está a la orden del día como son las Islas Canarias. Los contenidos referentes a estos temas se reparten entre varias asignaturas en varios cursos de ESO y Bachillerato. El análisis del conocimiento de los alumnos sobre el ciclo del agua, las aguas subterráneas y los recursos hídricos a partir de una encuesta a alumnos de 3º de la ESO de un centro del Sureste de Gran Canaria ha permitido identificar las carencias que tienen en estos aspectos. Asimismo, se hace una propuesta de actuación mediante actividades prácticas de aula y visitas a instalaciones hidráulicas para paliar la falta de conocimiento constatada.

Palabras clave: *Ciclo del agua, aguas subterráneas, recursos hídricos, Islas Canarias*

ABSTRACT

The water cycle is one of the most studied processes and one of the least really understood by students, who do not link the knowledge with their daily life. This reality is also transferred to society as reflected in the media, in a context of water scarcity like the Canary Islands. The contents related to these issues are exposed in several subjects in various ESO and Bachelor courses. The analysis of 3rd ESO students' knowledge about the water cycle, groundwater and water resources has been carried out in a Gran Canaria high school in order to characterize existing lacks. Also, a proposed action through practical classroom activities and visits to water systems is done to address the lack of proven knowledge.

Key words: *Water Cycle, groundwater, water resources, Canary Islands*

INTRODUCCIÓN

El agua en la hidrosfera se encuentra en los tres estados físicos: sólido, líquido y gaseoso, existiendo un movimiento o transferencia de las masas de agua entre un estado y otro y entre un lugar de la hidrosfera y otro. Este movimiento constituye el Ciclo del Agua o Ciclo Hidrológico, explicado desde los primeros cursos educativos de forma más o menos afortunada (figura 1). Hay que tener en cuenta que este modelo conceptual de circulación

de las aguas terrestres no fue aceptado por la gran mayoría de los científicos hasta hace poco más de dos siglos y que ciertos conceptos del mismo, como la relación entre aguas superficiales y subterráneas no se han desarrollado hasta muy entrado el siglo XX (Custodio y Llamas, 1983). Normalmente la parte visible del Ciclo Hidrológico es la parte superficial, quedando las aguas subterráneas relegadas a lo desconocido y/o incomprensible. Esto ocurre aun en la actualidad, cuando las aguas subterráneas siguen teniendo un aura esotérica cuyo máximo exponente son los zahoríes.

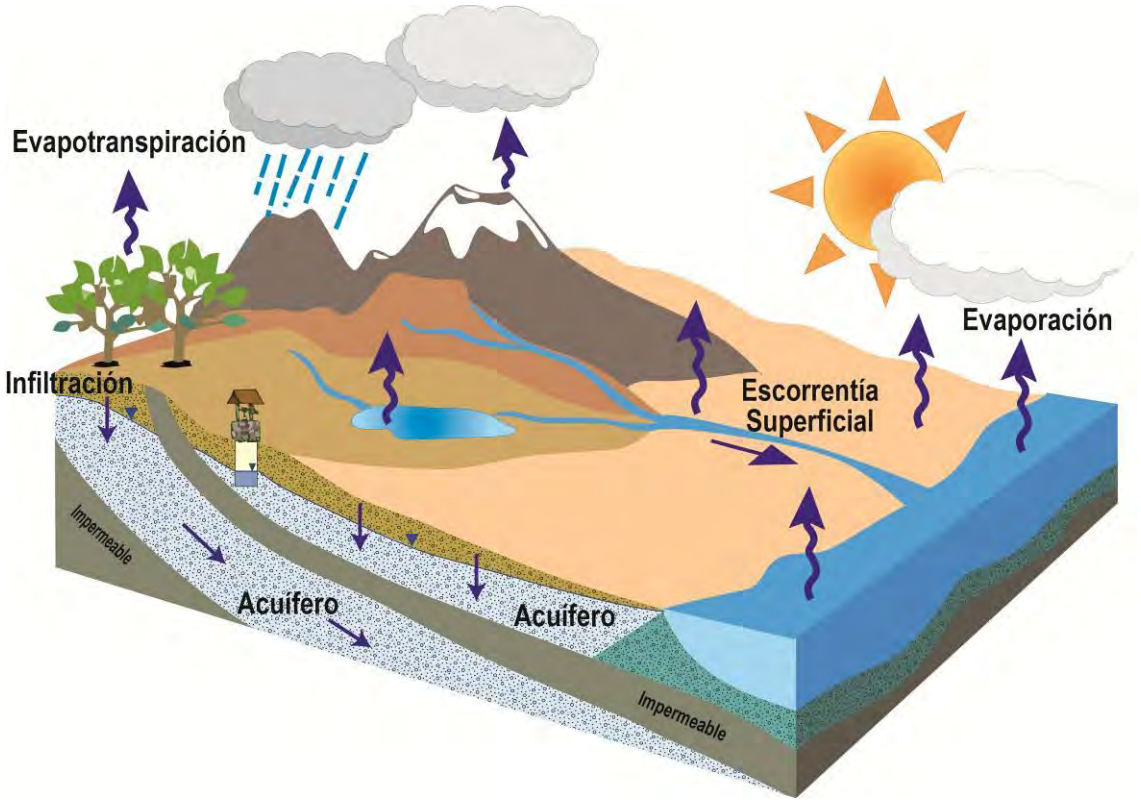


Figura 1. El Ciclo Hidrológico.

Con estos antecedentes, se comprende que existan abundantes errores conceptuales al respecto en la Sociedad en su conjunto, fruto muchas veces de los conceptos mal comprendidos en las etapas educativas. Sin embargo, los contenidos están recogidos profusamente en los temarios de la Educación Secundaria y posiblemente el problema provenga de la forma de explicar el Ciclo del Agua, normalmente de forma parcial, obviando el papel de las aguas subterráneas. Esta realidad queda patente en numerosas ilustraciones que aparecen en libros de texto de secundaria (Cabrera García, 2002; Esteban et al., 1989; Barrio Gómez de Agüero et al., 2003) y en artículos periodísticos (Figura 2). En ellas, se ejemplifica ampliamente los errores que suelen producirse en la representación del ciclo. El mayor problema lo presentan normalmente las aguas subterráneas, que quedan dibujadas como “embalses bajo tierra” o “cuevas rellenas de agua”, obviando la representación del agua ocupando los poros del terreno. Por otro lado, en otras figuras se olvida la transpiración o la evaporación, que en ningún momento pasan a representarse unidas como evapotranspiración.

En esta comunicación se presentan los resultados del Trabajo Fin del Master Universitario de “Formación del Profesorado de Educación Secundaria Obligatoria y Bachillerato, Formación Profesional y Enseñanza de Idiomas” de la primera de los firmantes

(Santana Armas, 2013; Santana Armas et al, 2014). El trabajo consistió en interpretar los resultados de una encuesta llevada a cabo a alumnos de la ESO sobre el conocimiento de las aguas subterráneas en un área con problemas hídricos como es Canarias, aportando algunas sugerencias sobre posibles experiencias prácticas a llevar a cabo para corregir las ideas erróneas y afianzar los conocimientos adquiridos en el aula de manera teórica.

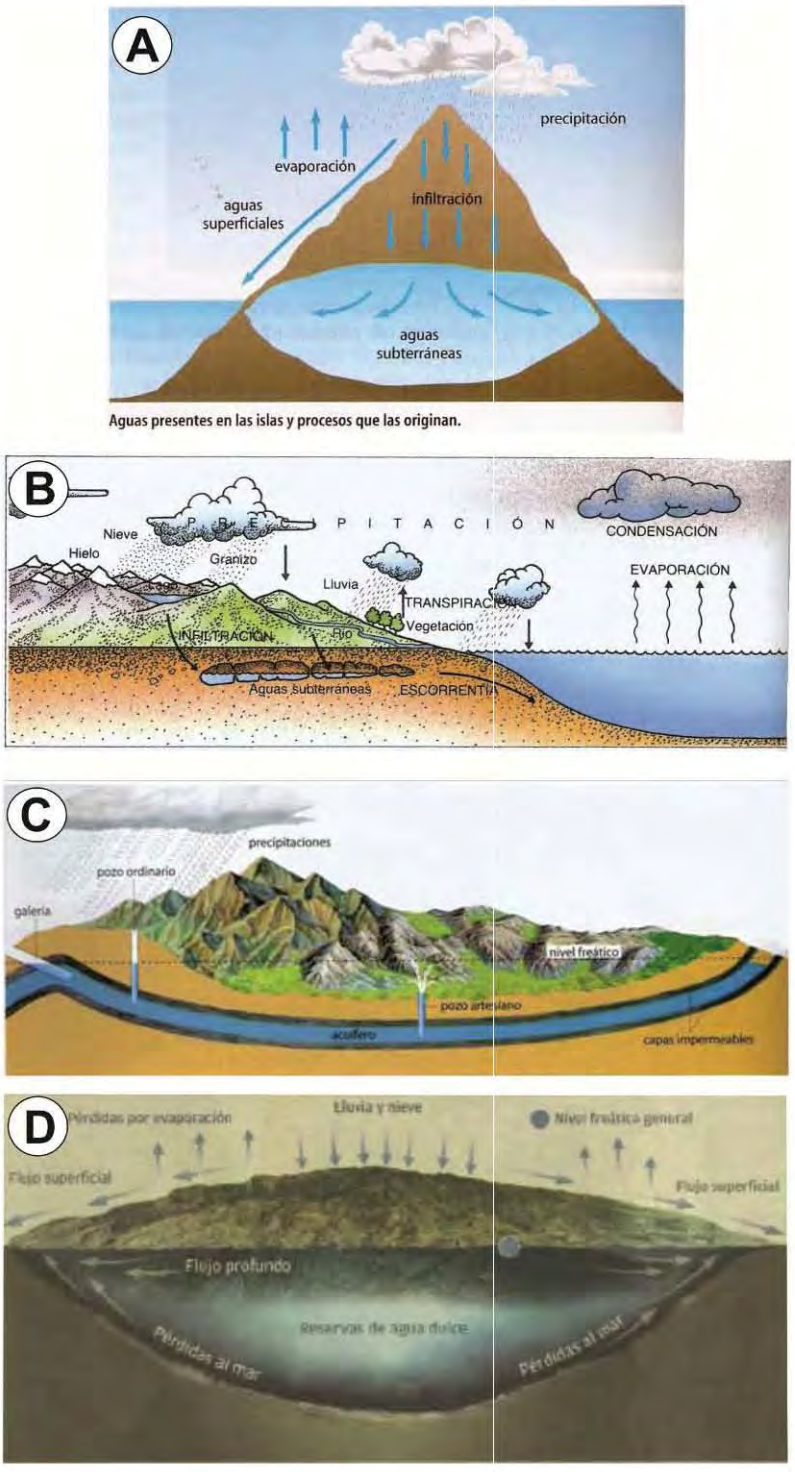


Figura 2. Representaciones del ciclo del agua en ilustraciones de libros de texto de secundaria: A) 1º de la ESO (Cabrera García, 2002); B) Ciencias Naturales de 2º de Formación Profesional, primer grado (Esteban et al., 1989); C) Ciencias de la Naturaleza de 2º de la ESO (Barrio Gómez de Agüero et al., 2003); D) Suplemento dominical del periódico La Provincia (Jiménez, 2013).

LA TOMA DE DATOS

La toma de datos se realizó en el IES Joaquín Artiles, un centro público situado en el municipio de Agüimes, al sureste de Gran Canaria. Se trata de una zona que estuvo tradicionalmente dedicada a la agricultura, con gran número de pozos de agua activos para suministrar agua a los cultivos intensivos de tomate. En los últimos tiempos, la zona ha sufrido una gran reconversión de su población al sector servicios, como mano de obra a la zona turística del sur de la isla. Para establecer los conocimientos previos, se realizó una encuesta a un grupo de 49 alumnos de 3º de la ESO, último nivel donde se estudia el ciclo del agua como tal. Las preguntas realizadas fueron las siguientes:

Bloque 1 – El ciclo del agua. Haz un dibujo del ciclo del agua
Bloque 2 – La evaporación ¿Por qué el agua de lluvia es dulce incluso cuando la fuente de evaporación es el mar?
Bloque 3 – Escorrentía superficial. ¿Qué entiendes por escorrentía superficial? ¿Qué factores influyen en la escorrentía superficial?
Bloque 4 – Las aguas subterráneas ¿Qué son los acuíferos? ¿Cómo se almacena el agua subterránea en el subsuelo? ¿Se mueve el agua del subsuelo? ¿Su velocidad es mayor, menor o igual que la del agua superficial? ¿Se pueden contaminar las aguas subterráneas?
Bloque 5 – Infiltración-Porosidad ¿De qué depende la infiltración de agua hacia el subsuelo? ¿Qué diferencia hay entre porosidad y porosidad eficaz?
Bloque 6 – Interacción del ser humano en el ciclo del agua ¿De qué manera puede el ser humano intervenir en el ciclo hidrológico? ¿De qué manera podemos obtener agua? ¿Cómo se pueden eliminar los contaminantes del agua afectada por agentes antropogénicos?

LOS RESULTADOS

La figura 3 muestra algunos ejemplos de ciclos del agua dibujados por los alumnos, mientras que la figura 4 recoge los gráficos de abundancia de diferentes términos tenidos en cuenta en los dibujos.

La pregunta relativa a la evaporación (Bloque 2) fue contestada correctamente por el 63% de los alumnos, mientras que un 27% tiene conceptos confusos sobre evaporación-condensación-precipitación y un 10% no contesta. La pregunta que pide definir la escorrentía superficial (Bloque 3) no es contestada por un 70% de los alumnos, mientras que un 18% la define como aquella agua que ni se filtra ni se evapora y solamente un 12% contesta correctamente. Ha de destacarse que los alumnos suelen confundir el concepto de filtración con el de infiltración. Como factor que influye en la escorrentía superficial solamente un 16% del alumnado contestó que la forma del terreno, mientras que el 84% restante no contestó esta pregunta.

El Bloque 4 incluye varias preguntas, todas relativas a las aguas subterráneas, cuyos resultados se muestran en la figura 5. Un acuífero es definido por el 53% de los alumnos como un depósito de agua subterránea, mientras que el resto contesta de forma variada pero incorrecta o no contesta. Solamente un 4% hace referencia a la acumulación del agua infiltrada en los poros del terreno, mientras que el 45% habla de filtración a través del terreno y el 41% cree que el agua se acumula en pozos y cuevas subterráneas. La mayoría de los alumnos piensan que el agua se mueve por el subsuelo, aunque su velocidad comparada con la escorrentía subterránea es desconocida en la mayoría de los casos. La pregunta que sí ha tenido una respuesta correcta en un 86% de los casos es la que se refiere a la contaminación de las aguas subterráneas, que consideran que pueden ser

contaminadas, frente a un 14% de alumnos que no contestan. Algunos alumnos incluso citaron posibles contaminantes como pueden ser microorganismos o elementos químicos.

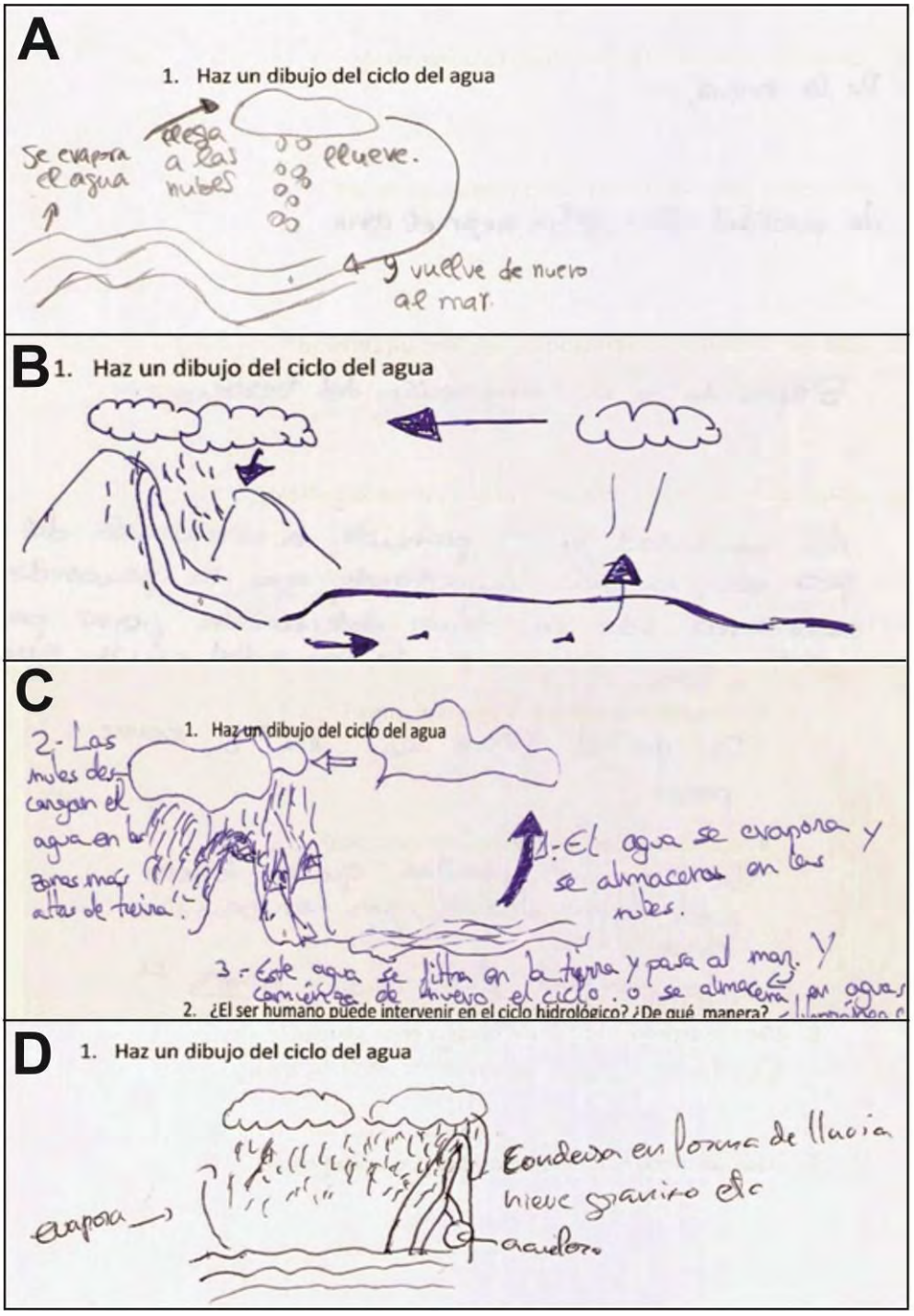


Figura 3. Ejemplos de ilustraciones elaboradas por los alumnos A) Modelo atmosférico. B) Modelo de circulación superficial. C) Modelo de circulación subterránea. D) Modelo de agua subterránea como una reserva independiente.

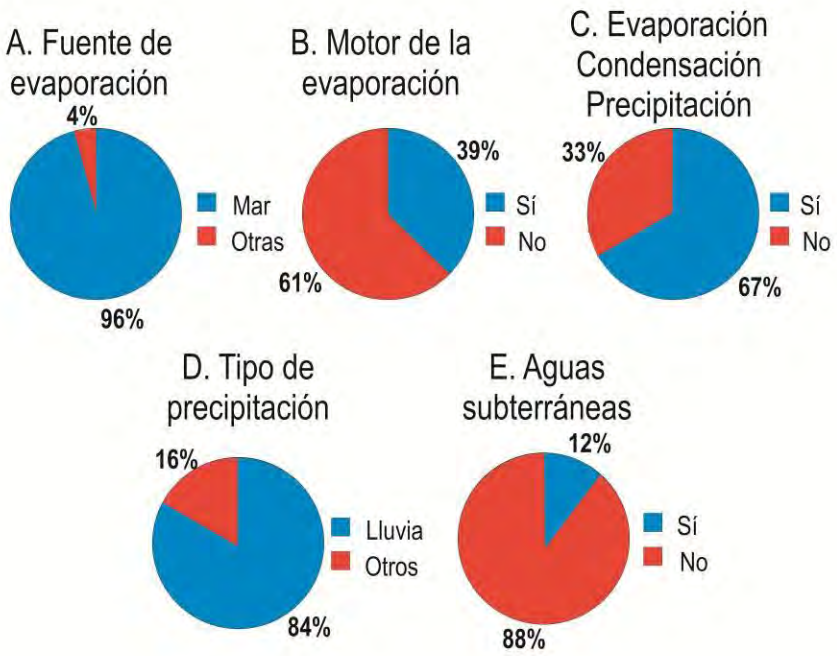


Figura 4. Gráficos representativos de las ilustraciones elaboradas por los alumnos en la encuesta realizada indicando los términos del ciclo hidrológico representado.

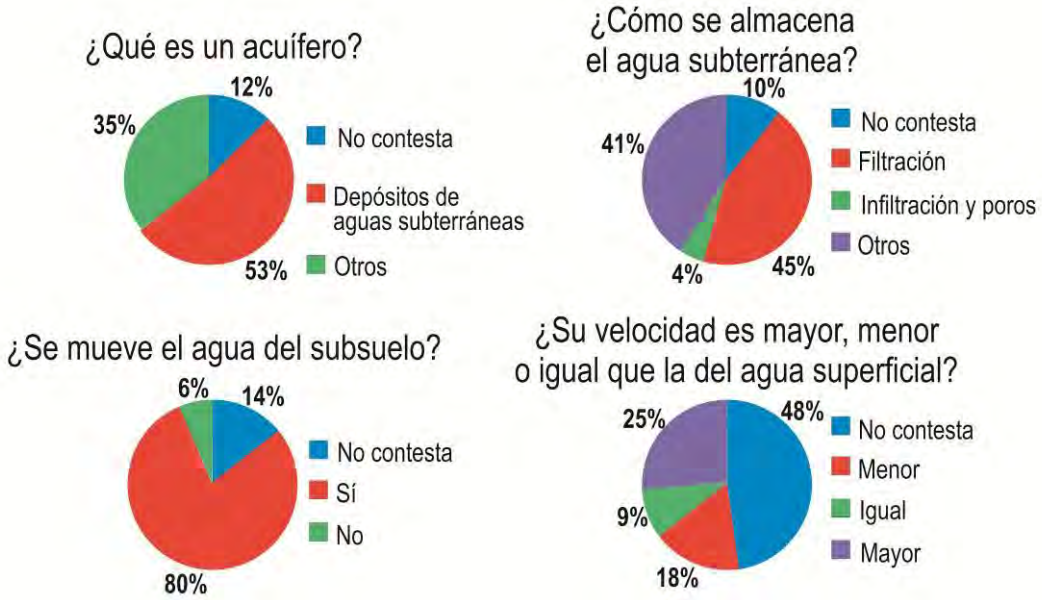


Figura 5. Resultados de las preguntas del Bloque 4 de la encuesta realizada, referentes a las aguas subterráneas.

Los conceptos de infiltración y porosidad, que se abordan en el Bloque 5, no son comprendidos correctamente (figura 6). Así, solamente un 6% de los alumnos relaciona la infiltración tanto con las condiciones ambientales como con las características del terreno, mientras que el resto la relaciona con uno u otro condicionante exclusivamente. Los

conceptos de porosidad y porosidad eficaz son comprendidos solamente por el 19% de los alumnos, mientras que un 61% de los mismos no contesta a esta pregunta.

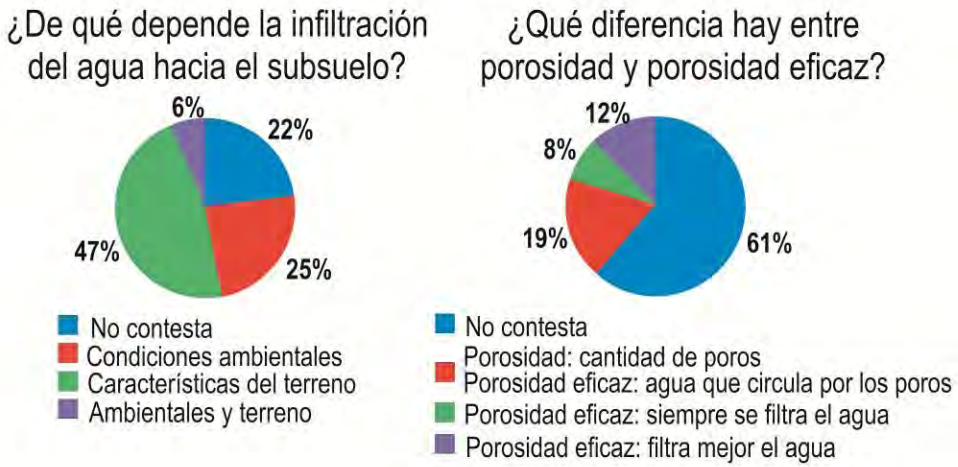


Figura 6. Resultados de las preguntas del Bloque 5 de la encuesta realizada, referentes a la infiltración y la porosidad.

Las preguntas del bloque 6 tienen las respuestas más variadas (figura 7). Es destacable que ningún alumno considera que el aprovechamiento de las aguas subterráneas es un modo de intervención en el ciclo hidrológico, aunque sí se citan los pozos, estanques y presas como medios de obtención de agua para un 10% de los alumnos. Los recursos hídricos no naturales, como la depuración y la desalación, son considerados por un 17% de los alumnos como fuentes de recursos hídricos.

Figura 7. Resultados de las preguntas del Bloque 6 de la encuesta realizada, referentes a la utilización de los recursos hídricos.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

A partir de los datos obtenidos, puede deducirse que el Ciclo Hidrológico está presente en los niveles educativos normalmente de forma descriptiva, sin que los alumnos relacionen los fenómenos descritos con los recursos hídricos que utilizan a diario. La relación entre el Ciclo del Agua y los recursos hídricos e incluso el conocimiento sobre el balance hídrico (ponerle número a los recursos hídricos que existen en un área determinada) no se refleja en los resultados de la encuesta. Resulta cuanto menos sorprendente que los alumnos encuestados no sean capaces de relacionar en la mayoría de los casos las preguntas de la encuesta con su vida diaria, teniendo en cuenta la repercusión que tienen los recursos hídricos en los medios de comunicación de Canarias y que las aguas subterráneas sean en general ignoradas, en una zona (el Sureste de Gran Canaria) donde existen abundantes pozos que siguen suministrando agua para la agricultura que aún persiste.

Como respuesta a los malos resultados obtenidos en esta encuesta con respecto al conocimiento sobre el Ciclo Hidrológico, deberían llevarse a cabo experiencias prácticas de aula, como las descritas por García (2009). Estas consisten en la elaboración de modelos 3D sencillos que ejemplifican los conceptos de evaporación y precipitación, escorrentía superficial, porosidad y acuíferos. Estas experiencias no pudieron desarrollarse en el aula durante el presente trabajo por falta de tiempo. Sin embargo, sí se llevaron a cabo visitas a la desaladora y la depuradora de la Mancomunidad del Sureste que suministra y trata respectivamente las aguas del Municipio. En estas visitas, los alumnos cumplimentaron un cuaderno con actividades a desarrollar antes (lectura de información), durante (toma de notas de las explicaciones de los técnicos) y después de las mismas (respuesta a las preguntas propuestas, que coincidían en gran parte a las que se les habían hecho en la encuesta). Los resultados de estas visitas y de los trabajos realizados fueron muy satisfactorios.

REFERENCIAS

Barrio Gómez de Agüero, J., Bermúdez Meneses, Mª.L., Faure López, A. y Gómez Esteban, Mª.F. (2003). *Ciencias de la Naturaleza de 2º de la ESO*. Ed Oxford University Press,1-220 pp.

Cabrera García, S. (2002). *Proyecto Exedra, Ciencias de la Naturaleza, 1º ESO*. Oxford University Press España, 1-40 pp.

Custodio, E. y Llamas, M.R. (1983). *Hidrología Subterránea*. Editorial Omega. Barcelona.

Esteban, M.V., Rojo, M.V. y Rubio, N. (1989) Ciencias Naturales de 2º Formación Profesional. Editorial Anaya,1-175 pp.

García, R. (2009). *Experiencias prácticas en el laboratorio*. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, (17.1), 78-85

Jiménez, J. *Ingeniería Hidráulica en Canarias*. La Provincia, 2013. Último acceso 5 de mayo de 2013. http://www.calameo.com/books/0023112778c847a8e4dc7

Santana Armas, A.I. (2013). *El Ciclo del Agua: Ideas previas que tienen los alumnos de 3º de la ESO y Propuestas para la mejora de su comprensión*. Trabajo de fin de Máster en el Máster Universitario de Formación del Profesorado de Educación Secundaria Obligatoria y Bachillerato, Formación Profesional y Enseñanza de idiomas. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Sin publicar.

Santana Armas, A.I.; Cabrera, M.C. y Pérez Torrado, F.J.(2014): *El Ciclo del agua y las aguas subterráneas en la educación secundaria de Canarias: ideas preconcebidas y propuestas de actuación.* En J. Sanz, T. Zamalloa, A. Uskola y A. Apraiz (eds.): XVIII Simposio sobre la enseñanza de la geología, Libro de Comunicaciones. Bilbao, pp. 225-235

ISBN: 978-84-938046-4-0

INSTITUCIONES Y GESTIÓN DEL AGUA EN CABO VERDE

Miguel SUÁREZ BOSA*

Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Faculta de Ciencias Económicas y Empresariales
Edificio Antiguo de Empresariales. Despacho nº 15. Campus de Tafira.
e-mail: miguel.suarezbosa@dch.ulpgc.es

RESUMEN

En este texto se analiza la gestión del agua en Cabo Verde desde la Independencia. En la Constitución de este país se declara el agua propiedad de la Nación y patrimonio común del pueblo; partiendo de esta base, el Estado ha configurado un entramado institucional para su administración. Pero la realidad es compleja pues hay que tener en cuenta que la actuación consuetudinaria del uso y la administración, se basa en prácticas características del modelo, heredero tanto de la época colonia como de la cultura africana. Según el mismo, el agua empleada en la agricultura puede proceder de los manantiales o *nascentes*, estando en este caso unida a la propiedad de la tierra; o de los *furos* o pozos, siendo entonces gestionada por los poderes públicos a través de las comunidades o asociaciones de agricultores.

Palabras clave: agua, cultura tradicional, gestión, instituciones.

ABSTRACT

We analyze in this text water management in Cape Verde since their Independence. In the Constitution of this country water has been declared Nation's property and national heritage; considering this, the State has shaped an institutional network in order to be able to administrate it. However, the real legal status is more complex. Customary uses and administration are based on characteristic practices of the model, being this heir not only from the colonial time but also from African culture. According to this model, water used in agriculture can come from springs or nascentes, being in this case linked to land property; or from furos or wells, and in this case is managed by public authorities through communities or farmer associations.

Keywords: institutions, evolution, management, technology, water.

INTRODUCCIÓN

En Cabo Verde se ha conformado un modelo de gestión del agua propio de un país de clima semiárido, cuyas características proceden tanto de la herencia colonial como de los aportes de la cultura del continente africano, a lo que se añade la impronta marcada por su condición de Archipiélago, compuesto de 10 islas habitadas con importantes diferencias entre ellas. El agua está íntimamente ligada a la tierra y es un recurso que condiciona su

productividad.

En la Constitución caboverdiana se declara el agua, en todas sus formas, propiedad del Estado y patrimonio común del pueblo. Pero el Estado ha tenido y tiene problemas para imponer su autoridad, ya que la legalidad institucional convive con la tradición, alérgica a cualquier tipo de control. Ante esta compleja realidad, la hipótesis de partida es que desde la independencia en este país conviven básicamente dos formas de gestión del agua: en los *nascentes*, predomina la gestión privada de un recurso común (*res communis*); mientras que en los *furos* y pozos, el recurso es estatal pero la gestión, casi siempre, es comunitaria (Wade, 1988:200). Esta última opción es impulsada por el Estado, aunque en muchos casos se ha encontrado con la resistencia de los propietarios.

En torno a la gestión de este recurso se ha configurado un entramado institucional formado por instituciones formales o informales, que dota al modelo de características singulares, por lo que la teoría institucional es apropiada para su estudio. Esta teoría analiza el papel de los derechos de propiedad y de las instituciones en la estructura y evolución de las formaciones sociales. Pero al tratarse de realidades fruto de dinámicas complejas, conviene tener en cuenta otras aportaciones teóricas y metodológicas como el análisis de la trayectoria histórica o *path dependence y* las condiciones de desarrollo endógenas o *embeddedness* (Granovetter, 2005).

Es cierto que a la hora de gestionar un acuífero hay dificultades para definir y hacer valer los derechos de propiedad; por otro lado, el agua es un *common pool resource* (CPR), que puede adoptar las formas comunal, privada, estatal o no estar sujeto a formas de propiedad alguna (Batista Medina, 1995). Para gestionar un recurso de esta naturaleza las soluciones también pueden venir “desde dentro”, es decir de los propios colectivos o usuarios, pues se constata que en determinadas circunstancias éstos son capaces de cooperar, es decir definir *a priori* compromisos creíbles y readaptarlos en el tiempo, frente a los cambios tecnológicos, por ejemplo (Ostrom, 1990).

La literatura especializada define las instituciones, formales o informales, como las “reglas del juego” o normas de conducta sancionadas socialmente que ordenan la interacción humana (North, 1993). El problema se plantea a la hora de considerar el papel que tienen, en la vida económica y social, las instituciones informales, muy frecuentes en la sociedad caboverdiana, ya que éstas se fundamentan no tanto en leyes o normas explícitas cuanto en creencias, tradiciones y culturas, las cuales cuesta clasificar.

Asimismo, la introducción de nuevas tecnologías, como la empleada en la perforación de pozos y *furos*, se ve condicionado por el marco institucional, pues junto con la tradición y el avance tecnológico, condiciona la propiedad y la distribución. Por otro lado, la orientación ideológica y política tiene una influencia decisiva en la gestión de recursos naturales. Llegado el caso, el entorno determina el cómo y el cuándo se utilizan nuevas tecnologías de riego, como es evidente en la agricultura caboverdiana practicada a raíz de la independencia. Generalmente, la difusión de nuevas tecnologías se enmarca en un entorno socioeconómico e institucional determinado.

La gestión del agua en estas islas es relativamente bien conocida, aunque no se disponga de estudio específico, a no ser los emanados de programas de cooperación internacional (BURGEAP, 1981) o de la propia Administración caboverdiana (PAGIRE, 2010). Por eso la información obtenida mediante entrevistas realizadas a protagonistas, y

recogidas en el contexto del Proyecto de Investigación SEMACA[1], ha permitido profundizar y matizar la procedente de otras fuentes.

Así, pues, el contenido de esta comunicación es el siguiente: después de esta introducción se establece el marco teórico; en el siguiente se exponen los rasgos más significativos de este recurso en Cabo Verde; a continuación se analiza el marco institucional para la gestión del agua y se caracterizan las instituciones, formales e informales y se hace una aproximación a la gestión. Finalmente, se exponen las conclusiones.

UN RECURSO ESCASO PARA ESTRUCTURAS AGRARIAS TRADICIONALES

En Cabo Verde apenas existen cursos de agua permanente, a excepción de la isla de Santo Antao, donde los cursos de agua alimentados por manantiales, mantienen un caudal apreciable durante todo el año. Las características climáticas y geomorfológicas determinan que la mayor parte de los valles sean recorridos pro cursos de agua temporales, durante la estación de lluvias. En la época de lluvias, las riadas pueden ocasionar efectos desastrosos; por otro lado, y paradójicamente, un importante volumen de agua se pierde en el mar. Diversos estudios evalúan la escorrentía superficial entre un 20 y un 53% del valor de la pluviometría, de tal manera que es superior a la pérdida por evaporación (PAGIRE, 2010: 36-37).

La procedencia del agua utilizada en la agricultura caboverdiana es mayoritariamente subterránea. De los 99.409 m^3/día de caudal explotado, el 61% procede de los cerca de 2.304 nacientes, incluyendo galerías; y un 15% de los 173 pequeños pozos o de los *furos,* que son pozos de mayor tamaño, entre 50 y 120 metros de profundidad y 30 cm. de diámetro (Informe sectorial de agua y saneamiento en Cabo Verde, 2007: 24). Los poderes públicos han estimulado y adaptada las técnicas tradicionales, como las *levadas*[2]*,* para transportar y distribuir el agua o almacenarla en los *reservorios* (tanques o depósitos), lo cual ha posibilitado aumentar la superficie irrigada (Lesourd, 1995: 208-217; Langworthy y Finan, 1997: 105-106). La práctica de almacenar agua con técnicas modernas es reciente en este Archipiélago. Los diques de contención se concentran en las islas de Santiago y Santo Antao, con 15 y 64 unidades respectivamente, mientras que los depósitos de almacenamiento suman 1.605; aunque se han proyectado varios embalses, solo se dispone de uno en funcionamiento y otro próximo a inaugurarse, ambos en la isla de Santiago.

El consumo del sector agrario representa alrededor del 50 % de las aguas explotadas, pero las diferencias entre islas y comarcas son considerables. A grandes rasgos, los terrenos pueden ser de *sequeiro* (el 93% de la superficie cultivable) o de regadío. Estos últimos rinde entre un 20 y un 25 veces más, pero históricamente han tenido problemas, desde el desigual drenaje hasta la baja cultura de los agricultores.

El regadío estaba y está concentrado en pocas manos. Por ejemplo, en la isla de Santiago, el 48% de las tierras regadas eran propiedad del 4% de la población antes de la independencia; no obstante, por la posterior reforma agraria muchas propiedades fueron repartidas y prohibida la aparcería (Silva Andrade, 1996; Carreira, 1977; Lesourd, 1995. 251 y 255-256), proceso que dio lugar a algunos conflictos. Por otro lado, predominan las

[1] El proyecto de Cooperación denominado SEMACA (Senegal, Mauritania, Cabo Verde), fue financiado por la Unión Europea dentro de los Proyecto MAC, 2007-2013, y se desarrollado entre enero de 2012-diciembre de 2013.

[2] Las *levadas* son acequias que conducen el agua por métodos artesanos, están cimentadas o excavadas en la roca aunque las más modernas son realizadas con mampostería.

pequeñas explotaciones familiares: suponen un 99,8%, es decir 32.193 de un total de 32.265, aunque haya que realizar alguna distinción ya que muchas de esta son "pequeños jardines irrigados", de no más de 900 m^2, lo cual dificultad la introducción de técnicas de ahorro de agua.

EL PAPEL DEL ESTADO EN LA GESTIÓN DEL AGUA

La iniciativa de los sucesivos gobiernos caboverdianos ha generado, desde la independencia (1975), un notable desarrollo legislativo sobre la gestión del agua. Las directrices gubernamentales son ejecutadas por los organismos con competencia para administrar el sector: el Conselho Nacional de Aguas (CNAG) y el Instituto Nacional de Gestión de Recursos Hídricos (INGRH), que planifican, desarrollan y protegen los recursos hídricos; mientras que, por su parte, la Agencia de Regulaçao Económica (ARE), institución administrativa independiente, dotada de funciones reguladoras, de supervisión y de aplicación de sanciones, promueve la cohesión social y protege los intereses y derechos de los consumidores. Por otro lado, las organizaciones no gubernamentales y las asociaciones comunitarias conforman la llamada Plataforma de ONGs, la cual participa en programas de desarrollo junto con las "organizaçones de camponeses", particularmente allí donde se practica la agricultura irrigada, participando a diversa escala en todas las fases de los proyectos de abastecimiento de agua y saneamiento (PAGIRE, 2010: 81).

La legislación colonial portuguesa, aunque fue derogada, ha tenido honda influencia en las normativas posteriores. El antiguo y colonial Código del Água, cuyos principios derivaban del derecho romano y del Código Civil (Caponera, 1981: 13), consagraba la propiedad privada del agua. Pero el Gobierno caboverdiano pretendió romper con la visión colonial y los principios individualistas del Código Civil, aunque propició el acceso a la propiedad a los pequeños campesinos y medianeros o aparceros, en un primer momento como "pos útil" y luego en "pos plena". También se permitió la apertura de pozos a particulares en casos especiales, debidamente justificados y con destino a usos agrícolas.

El modelo legislativo, en lo que se refiere a la regulación del sector del agua, se ha consolidado en diferentes fases. En una primera, que podemos fechar desde la independencia hasta 1987, se establecieron las bases del régimen jurídico de la propiedad y la gestión, mediante la promulgación del nuevo Código de Água, que contemplaba el principio de dominio público de los recursos hídricos y de las obras hidráulicas. En la segunda, iniciada en la década siguiente, se revisó dicho código (aprobado en 1999), mediante leyes que dieron paso a la iniciativa privada. Por último, en la fase actual, cuyo inicio se puede marcar en 2002, la preocupación del Gobierno es reglamentar la prestación de un servicio de calidad y la sostenibilidad, siendo pieza esencial el Plan Integral de Gestión Integral de los Recursos (PAGIRE, 2010).

Así, pues, en Cabo Verde el Estado ha sido el "maître d'oeuvre" en los manejos de los recursos hídricos (Lesourd, 1995: 208). Aunque las infraestructuras hidráulicas de captación son explotadas por particulares o asociaciones de productores, es el Estado el propietario legal de los *furos* y de la mayor parte de los equipamientos de bombeo, en muchos casos administrados por los Servicios Autónomos Municipales de Agua y Saneamiento o por las Cámaras Municipales. En estos casos, el Gobierno ha puesto la gestión en manos de las Comissoes de Água, con la presencia en ellos de un delegado del Gobierno y es dependiente del Ministério de Desenvolvimiento Rural; asimismo, ha conferido a las Comissoes de Moradores la competencia para regular el funcionamiento de los nacientes y fomentado la participación de campesinos y colectivos sociales, dando protagonismo a las agencias locales y comunitarias, dependientes o no de los municipios, tal vez haciendo un guiño a la herencia africana. No obstante, la realidad pone de manifiesto que la explotación

de las aguas por los Serviços Autónomos Municipais de Água e Saneamento o por las Asociaçao de Camponeses, no siempre está realizada de acuerdo con un régimen de explotación establecido con licencias de concesión (PAGIERE, 2010: 54), evidenciándose casos de cierto descontrol.

INSTITUCIONES FORMALES E INFORMALES. LAS ASOCIACIONES

La cuestión de la gestión del agua en algunas zonas del medio rural de Cabo Verde tiene similitudes con otros territorios africanos de clima árido, bien sea insular o continental. Las dificultades de acceso y almacenamiento condicionan la actuación de los agentes relacionados con el agua, aunque la incertidumbre es atemperada por los avances tecnológicos. No es extraño que la solidaridad comunal en el uso del recurso en el archipiélago sea semejante a la practicada en algunas zonas del Sahel semiárido, evidenciando que la forma de gestión está influenciada no solo por la disponibilidad del recurso, sino también por el contexto socio cultural en el que se enmarca.

Ahora bien, en la práctica en Cabo Verde el reparto del agua es diferente según sea obtenida de manera natural en *nascentes* o captada por perforaciones a la manera de *furos*, o pozos o galerías, como antes se vio. Aunque el Estado pretendiera centralizar la gestión y administración de los recursos hídricos, en la práctica, los dueños de *nacentes* siguen considerando el agua de propiedad privada *(recurso común de propiedad privada)*, y ellos mismos se encargan de su gestión, mediante arreglos informales particulares. El agua de esta procedencia, generalmente empleada en la agricultura, está unida a la propiedad de la tierra, de acuerdo con el sistema heredado de la época colonial, sin que en la práctica se haya modificado sustancialmente después de la independencia, de tal manera que está controlada y gestionada en régimen de propiedad privada, haciéndose su reparto mediante acuerdos o arreglos entre los agricultores propietarios.

En este caso, los campesinos explotan las aguas por el sistema de repartición de los recursos, de manera individualista; las asociaciones de usuarios están casi ausentes o son de reciente constitución, sin que hayan dado mucho fruto las recomendaciones de los programas de cooperación, como por ejemplo el desarrollado en el valle Paul por una misión norteamericano[3]. El Estado se ha encontrado con la resistencia de los antiguos propietarios, y, aunque intente denodadamente promover programas para modificar los modos de gestión de los recursos hídricos y controlar la utilización del agua para los fines domésticos, es poco respetado.

Por el contrario, en los *furos* y pozos, la situación es diferente. La mayor parte del agua de esta procedencia es administrada mayoritariamente por comunidades locales o asociaciones de agricultores. Hay que hacer notar que en este caso la acción del Estado ha tenido más éxito: ha fomentado la acción comunitaria, promovido la actividad de las comunidades y de las asociaciones de *camponeses* y organismos locales, lo cual ha dado lugar a un entramado legislativo complejo. Asimismo, conviene tener en cuenta prácticas informales, producto de la influencia cultural de raíz africana como la *djunta-mó*[4].

El resultado ha sido una gestión más eficiente de los equipamientos. En alguna medida se adapta a los principios de la ética del agua con los sistemas de gestión comunitaria, que

[3]Según nos indicó el presidente de la Asociación AmiPaul, en entrevista antes citada y Langworthy y Fina (1997). La comparación con otros territorios es desfavorable, por ejemplo en Canarias el sistema de Heredades y/o Comunidades es más eficiente.

[4]*Djunta-mó,* es en Cabo Verde una forma de ayuda mutua, heredera de África, que significa literalmente juntarse y unir las manos en un esfuerzo común para conseguir grandes objetivos.

si bien está algo idealizada, es cierto que implica poblaciones no pasivas, conscientes tanto de sus derechos como de sus deberes, de las consecuencias de cada gestión, de la importancia durable del recurso. Otorgar la responsabilidad de las comunidades locales en las zonas rurales constituye una cuestión primordial para todos los países pobres y con escasos recursos, como Cabo Verde.

No obstante, hay que relativizar la bondad de estas prácticas y poner de manifiesto el persistente individualismo, especialmente en Santa Antao y otras islas de barlovento, donde predominan las costumbres europeas, pues el campesino no cedía fácilmente el agua aunque le sobrase, prefiriendo antes anegar sus tierras, según el principio de "quanto mais agua, melhor", como es frecuente oír en medios rurales caboverdianos, con manifiesto perjuicio de la comunidad y el despilfarro (Silva Évora, 2009).

Lo dicho anteriormente no es contradictorio con que en la gestión consuetudinaria los horticultores reinterpreten y adapten usos y costumbres comunales de ayuda recíproca, combinando el *calendário* de riego con la práctica de la *djunta-mo*, especialmente en Santiago y otras las islas de sotavento, con mayor influencia africana. Esta costumbre de ayuda mutua es, también, una respuesta a las dificultades que representa la omnipresencia del medio físico, la cual se manifiesta en forma de grandes precipitaciones o ciclos de sequía que destruyen sistemáticamente los recursos vitales causando frecuentes destrozos y grandes hambrunas, por lo cual es natural que se alienten estrategias defensivas de preservación de los recursos naturales.

LOS SISTEMAS DE REPARTO DE AGUA. EL CALENDARIO

En ambos tipo de las prácticas el agua para riego se reparte en función de la cantidad de tierra, es decir, a una cantidad determinada de tierra le corresponde un cierto número de días de agua (Silva Évora, 2009). Para su ordenamiento se elabora un calendario[5]. La distribución mediante este sistema, con variaciones según la tradición y el lugar, se aplica tanto en el agua procedente de los *furos* como de los *nascentes*. El encargado de aplicarlo es el *meirinho*, individuo que la reparte según el número de horas de agua pertenecientes a cada propiedad, de acuerdo con el "Código de Posturas"[6]; asimismo, este personaje es el responsable de aplicar las sanciones a los transgresores, aplicando las resoluciones de la Cámara Municipal o Junta Local[7].

Para el establecimiento del calendario no existen reglas que obedezcan a preceptos de tipo técnico. El agua es servida por un tiempo, mediante rotaciones fijas, disponiendo cada vecino de un número específico de horas, o la puede utilizar hasta que termine de inundar su terreno. Una vez establecido el número de jornadas se mantiene como "uso y costumbre", transmitiéndose de generación en generación, fijada c**o**mo la cantidad de agua en manos de esa propiedad.

El sistema de calendario se caracteriza por servir el agua de forma muy espaciada: solo un 6% de las reparticiones son inferiores a 7 días, por el contrario, 14% son de 8 a 15 días,

[5] Es un sistema similar a las dulas, empleado en varios lugares de la Península Ibérica y en Canarias y en el Norte de África (Glick, 1972).

[6] En Portugal se conocía originariamente como "código de postura" a los documentos que reunían un conjunto de normas municipales, en todas las áreas de actuación del poder público.

[7] La posibilidad de sancionar a los trasgresores, es una de las condiciones necesarias, aunque no suficiente, para el buen funcionamiento de un sistema comunitario y evitar el problema del "gorrón" (Ostrom, 1990).

71% de 15 a 30 días y un 10% tienen un intervalo superior a 30 días[8]. El tipo de calendario está en relación con las técnicas tradicionales, por lo que frecuentemente se opta por la inundación de los "tajos" en que se divide la parcela, pudiendo utilizar el agua en el terreno durante un lapso de tiempo muy largo (Faure, 2001: 79-80). Esta manera de proceder tiene, como es obvio, varios problemas, particularmente el despilfarro del recurso; asimismo, ¡el tipo de cultivo más frecuente es aquel que mejor se adapta a este sistema! De ahí que se sigue cultivando caña de azúcar, aunque sea un cultivo muy exigente en agua[9].

En la mayoría de los furos la distribución de agua la hace el *motorista*. Se trata de un funcionario del estado que reparte el agua mediante el *calendario*. En este caso, la forma más frecuente de distribución de agua es que el agricultor puede acceder a ella una vez por mes y un número de horas suficiente, según la tierra que posee en uso, pero si le sobra agua puede acumularla en un tanque o bien cederla a otro agricultor (Ferreira Couto, 2010: 189-197).

Frecuentemente el agua se da en forma préstamo o "troca de agua"[10], una adaptación cultural del campesinado a las condiciones reales. Se trata de un acuerdo entre propietarios, los cuales consideran que cediendo el turno dona una parte de su derecho, lo cual deviene en la puesta en común del agua: un determinado propietario cede al vecino el agua sobrante de su propiedad, pasando a regar el terreno de éste los días que correspondían al primero, por ejemplo si el caudal o *mae d'água* (medida de la cantidad de agua) era abundante, lo cual le permite regar en menos tiempo. Los intercambios son frecuentes en el seno de la familia (extensa), entre hermanos, tíos y sobrinos, etcétera, práctica que permite moderar o modular el sistema de calendario.

CONCLUSIONES

En Cabo Verde se ha configurado un marco institucional que garantiza, en teoría, los derechos de propiedad y regular la gestión del agua. Ello es obstáculo para que, en determinadas circunstancias, los propios individuos puedan ser capaces de elaborar compromisos creíbles *a priori*, sin recurrir a una autoridad externa; incluso, esta cooperación pude ser propiciada por la Administración, como en la gestión del agua procedente de los furos y reservorios. En efecto, la adopción histórica de instituciones formales e informales, nacidas desde dentro de la propia sociedad, ha facilitado a los agentes desarrollar acuerdos para la gestión del agua. Pero, también, queda patente que si esos derechos no están bien definidos, pueden causar disfunciones.

Nos encontramos, pues, con los siguientes elementos para el debate:

1. El agua procedente de los *nascentes* se puede considerar como un CPR, pero de propiedad privada. Su gestión y la práctica individualizada y el riego por inundación, puede dar lugar a prácticas despilfarradoras.

2. La mayor parte de los *furos* y pozos son propiedad del Estado, aunque también hay de propiedad privada. Cuando son de propiedad estatal, se fomenta la gestión comunitaria mediante la participación de las comunidades y asociaciones locales. En este caso, al ser claras las reglas de actuación, su gestión es más eficaz.

[8] *Schéma Directeur pour la mise en valeur des ressources en eau (19993, 2005)*, PNUD, ONR/Departament Économique et Social, CNAG (citado por Faure, 2001).

[9] Según nos aseguran los entrevistados, por ejemplo José Manuel Pires Ferreira, presidente de la Asociación AmiPaul (6/12/2013), opinión corroborada en otras entrevistas.

[10] Se puede considerar un sistema de ayuda mutua, semejante al *Djunta-mó*, frecuente en las tareas agrícolas.

3. La introducción de tecnología en la captación de agua (en la prospección de *furos* y pozos) o en el riego (instalación del goteo), frecuentemente alentada por la Administración, está acompañada del fomento de la gestión comunitaria.

4. Las prácticas consuetudinarias basadas en la cultura tradicional de ayuda mutua, tienen una importancia relevante. La gestión colectiva de los tanques de agua o reservorios es habitual y fomentada por el Gobierno, retomando las prácticas tradicionales.

REFERENCIAS

Batista Medina, J. A. (1995). "Algunos aspectos económicos y sociales de la gestión del agua de riego como recurso de propiedad común: estudio de un caso", Agricultura y Sociedad, nº 74, pp. 39-66.

BURGEAP (1981): La mise en valeur des eaux souterraines dans l'archipel du Cap-Vert: approche des contraintes climatiques et évaluation des ressources en eau, Praia.

Caponera, Dante A. (1981). El derecho de agua en algunos países africanos, Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Estudios Legislativo, nº 17, Roma.

Faure, X. (2001). Le défi de la valorisation des ressources en eau dans les vallées irriguées au Cap-Vert. L'exemplñe de la vallées de Sao Joao Baptista (Mnunicipe de Praia, Île de Santiwago), Mémoire de Maîtrise de Géographie Réalisé sous la direction de Mr. Le Prefesseur Michael Lesourd).

Ferreira Couto, C. (2010). Incerteza, adaptabilidade e inovaçao de Santiago de Cabo Verde, Fundaçao Caouste Gulbenkian/Fundaçao Para a Ciencia a Tecnologia/Ministerio de Ciència, Tecnologia e Ensino Superior, Depósito Legal nº 313886/10.

Glick, Thomas F. (1972). The Old World Background of The Irrigation System of San Antonio, Texas, Texas Western Press.

Granovetter, M. (2005). "The impact of Social Structure on Economic Outcomes", Journal of Economic Perspectives, 19 (1), pp.33-50.

Lesourd, M. (1995). État et société aux îles du Cap-Vert. Alternatives pour un petit État insulaire, Karthala, París.

Langworthy, Mark y Finan, T. J. (1997). Waiting for Rain: Agriculture and Ecological Imbalance in Cape Verde, Lynne Rienner Publishers, London.

North, D. (1993). Instituciones, cambio institucional y desempeño económico, Fondo de Cultura Económica, México.

Ostrom, E. (1990). Governing the Commons. The Evolution of Institutions for Collective Action, Cambridge (Mass.), Cambridge University Press.

PAGIRE (2010). Plano Nacional de Gestao Integrada das Recursos em Agua, Gobierno de Cabo Verde, Praia.

Silva Andrade, E. (1996): Les îles du Cap-Vert de la "Découverte" a l'Independence Natinale (1460-1975), L'Harmattan, París.

Silva Évora, J. (2009). "A terra, a Águas e o Poder na comunidade Tarrafal de Monte Trigo, Porto Novo, Sto Antao", Africana Studia, nº 13, pp. 39-52.

Wade, R. (1988). Village republics. Ecomic conditions for collettive action in South India, Cambridge University Press, Cambridge.

ISBN: 978-84-938046-4-0

ANÁLISIS DE LA MATERIA ORGÁNICA DISUELTA EN AGUA: APLICACIÓN DE LA RESONANCIA MAGNÉTICA NUCLEAR (^{1}H-NMR)

Francisco Javier TOLEDO MARANTE

Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Departamento de Química (Grupo de Tecnología Química y Desarrollo Sostenible). 35017 Las Palmas de Gran Canaria, España.
franciscojavier.toledo@ulpgc.es

RESUMEN

La aplicación de la espectroscopía de resonancia magnética nuclear de protón (^{1}H-NMR) a medios acuosos se hizo posible mediante un aparato AMX 300 MHz (Bruker) a través de un programa de pulsos incluido en el propio software que controla al espectrómetro. Dado que la secuencia de pulsos habitual (PROTON) produce una señal intensa a δ 4.67 debida a la propia agua, se utilizó un programa de pulsos (protonh2o) que la elimina por completo por irradiación a una potencia hl2 de 60 dB. Esto permitió ver y medir las señales correspondientes tanto a los hidratos de carbono como a los alcanoles.

Palabras clave: *Materia orgánica. Resonancia magnética nuclear.*

ABSTRACT

The application of the proton nuclear magnetic resonance spectroscopy (1H-NMR) to aqueous solutions was possible by means of an AMX 300 MHz equipment (Bruker), using a pulse program included by the manufacturer in the provided software. As the default pulse sequence (PROTON) produces an intense signal at δ 4.67 due to the water itself, a pulse program (protonh2o) was used instead, which with a hl2 power of 60 dB removes it completely by irradiation. This allowed the signals corresponding to carbohydrates and alcanols to be appreciated and measured.

Key words: *Organic matter, nuclear magnetic resonance.*

INTRODUCCIÓN

Dentro del proyecto estructurante CONVAGUA puesto en marcha en 2011 en la Comunidad Autónoma Canaria, el grupo de Tecnología Química y Desarrollo Sostenible de la ULPGC abordó la posibilidad de identificar y cuantificar la materia orgánica disuelta en efluentes acuosos naturales e industriales del archipiélago canario. Ya en el I Congreso Interdisciplinar del Agua, CINA 2014, se puso de manifiesto mediante una comunicación virtual la necesidad de analizar la materia orgánica disuelta en agua (Toledo, 2014).

METODOLOGÍA

Tras adicionar a la muestra un 10% de agua deuterada para que el aparato pueda coger el "lock", se hicieron espectros normales de protón mediante el programa de pulsos "PROTON". A partir de éstos se midió el parámetro O1 de la señal del agua (los valores para cada muestra fluctuaron en torno a 1409.1). A continuación, con el programa de pulsos "Water supression" del software del propio aparato, personalizado con el nombre "protonh2o", se recorrieron espectros tras introducir dicho parámetro en la tabla de parámetros de adquisición. El resto de los parámetros instrumentales se mantuvieron fijos (por ejemplo, ns=32, CY=50, etc). Los espectros impresos se integraron manualmente y las áreas obtenidas a partir de muestras-patrón se graficaron frente a concentración, obteniéndose las curvas de calibrado que nos permitieron hacer los análisis cuantitativos. Así por ejemplo, el etanol de aguas contaminadas con licores se puede medir tanto mediante el cuartete que produce a δ 3.65 como el triplete que produce a δ 1.18, mientras que los azúcares (glucosa ó sacarosa) que componen diversos efluentes industriales se miden mediante el multiplete que presentan en el intervalo δ 3.3 – 4.3. El calibrado de los espectros se realizó por incorporación de un patrón interno, el DSS (4,4-Dimethyl-4-silapentane-1-sulfonic acid I) 0.25 mM ó el TSP {3-(trimethyl)propionic-2,2,3,3-d_4 acid, sodium salt II) 0.00347 mM a las muestras según recomienda la bibliografía (Pohl *y col*, 1969). Alternativamente, puede usarse el DSA (4,4-Dimethyl-4-silapentane-1-ammonium trifluoroacetate III) para evitar algunos inconvenientes que presenta el DSS en el estudio de analitos sensibles al pH (Nowick *y col*, 2003). Las estructuras moleculares de estos patrones puede observarse en la Figura 2.

Figura 1.- El aparato de Resonancia Magnética Nuclear de 300 MHz de la marca Bruker de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

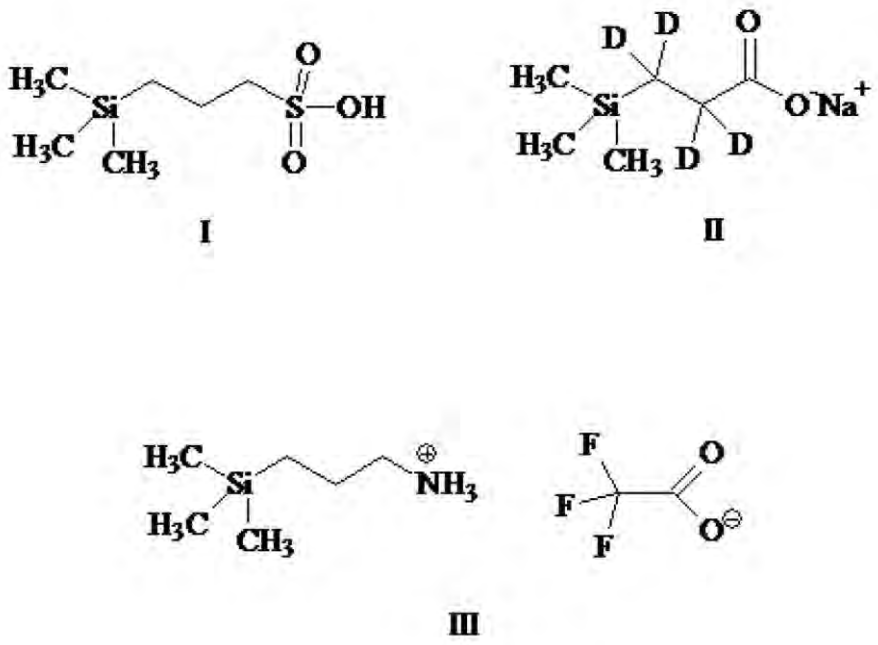


Figura 2.- Patrones internos para la resonancia magnética nuclear de disoluciones acuosas. DSS (I), TSP (II) y DSA (III).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La metodología propuesta sirve tanto para el análisis cualitativo como para el cuantitativo. Veremos a continuación un ejemplo de cada tipo.

El espectro del agua

En la Figura 3 se observa el espectro normal de ^{1}H-RMN de una muestra de agua contaminada con sacarosa (2.0 mM). Como se puede apreciar, sólo se distingue la intensa señal del agua a δ 4.67. El contaminante pasa desapercibido. Será necesario medir el O1 de dicha señal y decirle al software "protonh2o" que la sature por irradiación de radiofrecuencias con una intensidad de 60 dB.

Identificación de componentes orgánicos disueltos

En la Figura 4 puede observarse el espectro de ^{1}H-RMN de una muestra acuosa contaminada con hidratos de carbono después de aplicar el programa de pulsos "protonh2o". A δ 5.39 (doblete, J 3.93 Hz) puede observarse la señal del protón anomérico (H-1), lo que delata al contaminante como sacarosa. En el intervalo de δ 3.4 - 4.3 se aprecian los restantes trece protones geminales a oxigeno y a δ 0.00 aparece el grupo $(CH_3)_3Si$- del patrón interno, el DSS. Como era de esperar, el DSS deja además tres señales originadas por los metilenos, a saber, un primer triplete a δ 0.65, un multiplete a δ 1.78 y un segundo triplete a δ 2.90. Estas señales pueden solapar con las del analito.

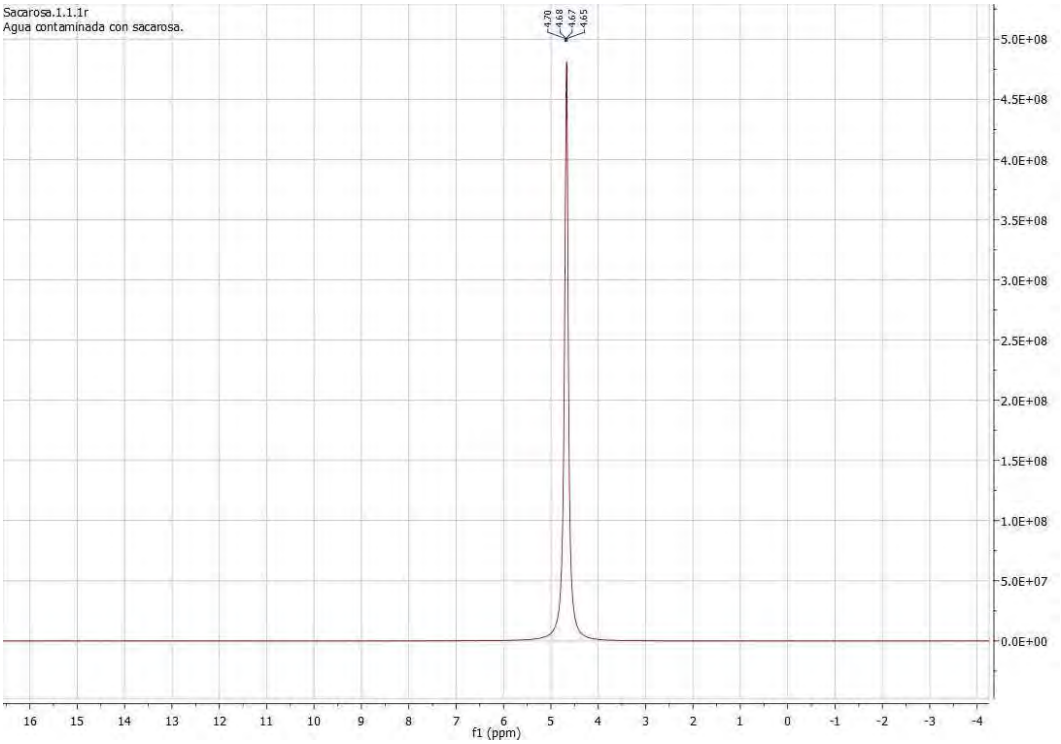


Figura 3.- Espectro normal de ^{1}H-RMN del agua contaminada con sacarosa. Sólo se aprecia la señal del agua a δ 4.67. En este espectro medimos el parámetro de adquisición O1.

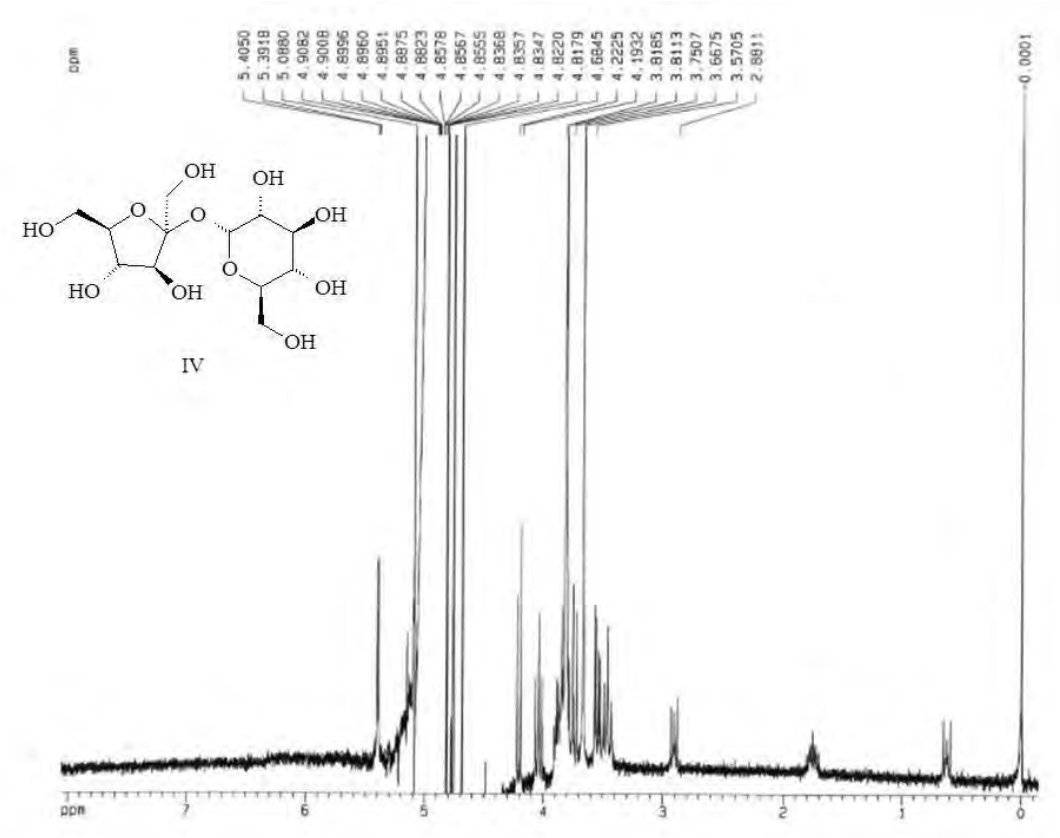


Figura 4.- Espectro de ^{1}H-RMN de una muestra acuosa contaminada con sacarosa (IV) (2.0 mM), con DSS 0.5 mM como patrón interno. Obtenido con el programa supresor de la señal del agua "protonh2o" y procesado a ns=16.

Cuantificación de componentes orgánicos disueltos

En la Figura 5 puede observarse el espectro de ^{1}H-RMN de una muestra acuosa contaminada con etanol. A δ 3.67 puede observarse la señal del CH_2 etanólico, a δ 1.20 puede observarse el triplete producido por el CH_3 etanólico, y a δ 0.00 aparece el grupo $(CH_3)_3Si$- del patrón interno, en este cado el TSP (II). Al ser el TSP un patrón deuterado, no produce señales secundarias que puedan interferir con las del analito.

En la Figura 6 se representa la relación {area del pico del CH_3 etanólico/ area del pico del $(CH_3)_3Si$ del TSP} frente a la composición en etanol (%w/v). Esta curva de calibrado nos permite cuantificar la cantidad de etanol presente en aguas contaminadas por el mismo.

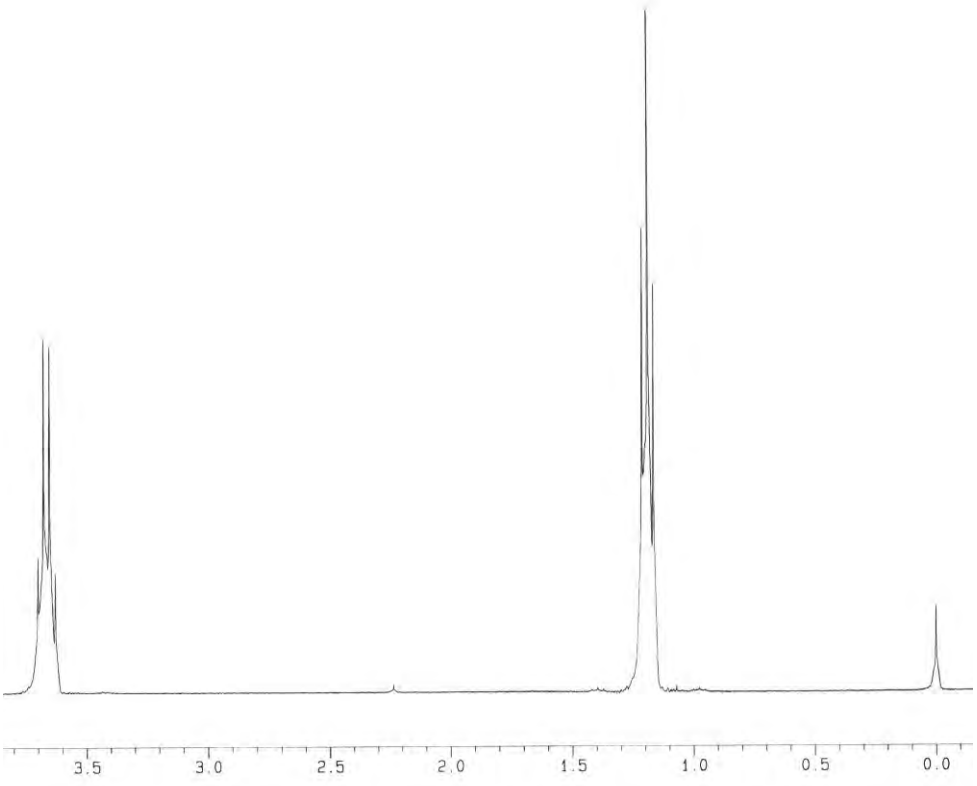


Figura 5.- Espectro de ^{1}H-RMN de una muestra acuosa con etanol disuelto (0.2 % w/v), obtenido a ns=32, con el programa supresor de la señal del agua "protonh2o" e impreso a CY=50.

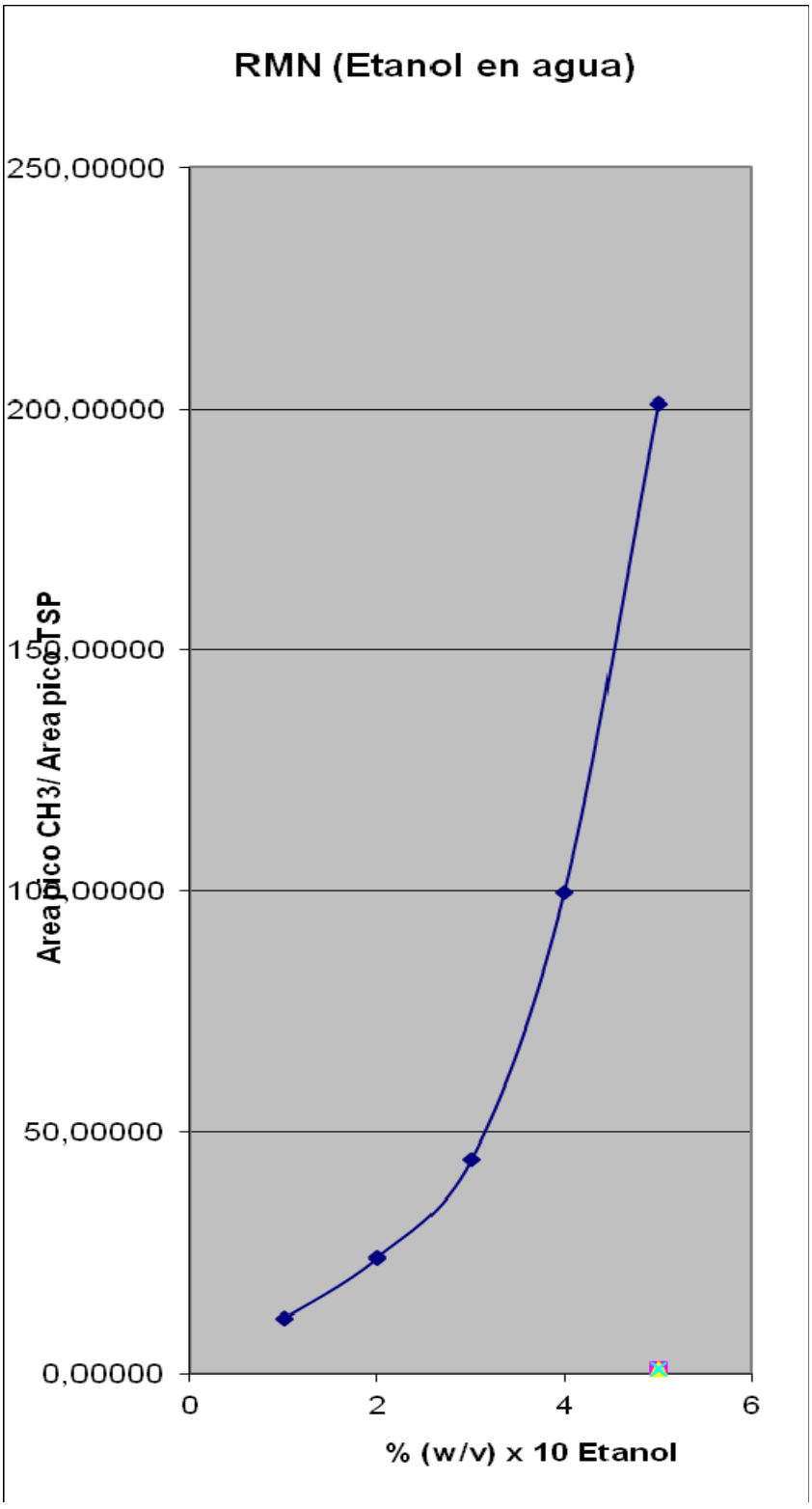


Figura 6.- Curva de calibrado para el triplete del CH_3 del etanol. TSP= sal sódica del ácido trimetilsililpropiónico deuterado usado como patrón interno a c=0.00347 mM.

CONCLUSIÓN

La resonancia magnética nuclear de protón es una potente herramienta para identificar y cuantificar los contaminantes orgánicos del agua.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece la subvención concedida al proyecto "Recursos Ambientales en la Provincia de Las Palmas: Ciencia y Tecnología para el Diagnosis y Aporte de Soluciones {Estructurante (ULPAPD-08/01-5) SI-697}" concedido por la Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información.

REFERENCIAS

Nowick, J.S.; Khakshoor, O.; Hashemzadeh, M. and Brower, J.O. (2003). *DSA: A new Internal Standard for NMR Studies in Aqueous Solution*. Organic Letters 5(19): 3511-3513.

Pohl, L. & Eckle, M. (1969). *Sodium 3-(trimethylsilyl)tetradeuteriopropionate, a new water-soluble standard for ^{1}H-NMR*. Angewandte Chemie, International Edition in English 8(5):381.

Toledo, M. F.J.(2014). *Análisis de la materia orgánica disuelta en efluentes industriales acuosos: aplicación de la resonancia magnética nuclear (^{1}H-NMR)*. I Congreso Interdisciplinar del Agua (CINA 2014) –congreso virtual-.

ÁREA TEMÁTICA 2

CARACTERIZACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES: AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES

ISBN: 978-84-938046-4-0

CONTENIDO DE RADÓN EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL NORESTE DE GRAN CANARIA

Héctor ALONSO-HERNÁNDEZ, Tatiana CRUZ-FUENTES, Alejandro RODRIGUEZ-GONZALEZ, Jonay GONZÁLEZ-GUERRA, Miguel Ángel ARNEDO-AYENSA, Pablo MARTEL-ESCOBAR, Alicia TEJERA-CRUZ, María del Carmen CABRERA, Francisco José PÉREZ-TORRADO, Jesús GARCÍA-RUBIANO

Departamento de Física, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 35017 Las Palmas de Gran Canaria, España, hector.alonso@ulpgc.es; tcruz@proyinves.ulpgc.es; alerglez@gmail.com; jglezg2002@gmail.com; miguelangel.arnedo@ulpgc.es; pmartel@dfis.ulpgc.es; atejera@dfis.ulpgc.es; mcarmen.cabrera@ulpgc.es; franciscojose.perez@ulpgc.es; jesus.garciarubiano@ulpgc.es

RESUMEN

En este trabajo se han determinado los niveles de ^{222}Rn en el agua subterránea en la zona noreste de Gran Canaria a partir de 28 muestras de pozos en bombeo. La concentración de actividad de radón en una muestra de agua se determina mediante un sistema en circuito cerrado que consta de un monitor AlphaGUARD que mide la concentración de radón en aire por medio de una cámara de ionización y un conjunto AquaKIT que se utiliza para transferir el radón disuelto en la muestra de agua al aire del circuito. Los valores de la concentración de radón en agua de las muestras estudiadas varían entre 0.9 y 76.9 Bq/L. Debido a la peligrosidad radiológica del radón, en España se ha establecido un límite de actividad de 100 Bq/L de ^{222}Rn para las aguas de consumo humano. Los valores obtenidos para todas las muestras analizadas se encuentran por debajo de este límite.

Palabras clave: *radón, aguas subterráneas, terrenos volcánicos, normativa.*

ABSTRACT

In this work we have determined the levels of ^{222}Rn in 28 samples from pumping wells in groundwater in northeastern Gran Canaria. The radon activity concentration in a water sample is determined by a closed loop system consisting of an AlphaGUARD monitor that measures the concentration of radon in the air by means of an ionization chamber, and an AquaKIT set that transfers the dissolved radon in the water samples to the air in the circuit. The radon concentration in water samples studied varies between 0.9 and 76.9 Bq/L. Spanish radiological protection regulations limit to 100 Bq/L the concentration of ^{222}Rn for drinking water. The values obtained for all the analyzed samples are below this threshold.

Key words: *radon, groundwater, volcanic terrains, normative.*

INTRODUCCIÓN

El radón es un gas noble radiactivo presente en las cadenas de desintegración de radioisótopos naturales como el ^{238}U, ^{232}Th y ^{235}U (Hopke, 1987). Existen tres isótopos naturales de radón (^{222}Rn, ^{220}Rn y ^{219}Rn) correspondientes a cada una de las cadenas, pero el ^{222}Rn es el más utilizado como trazador geoquímico natural en Ciencias de la Tierra, debido a sus casi 4 días de vida media. Las principales fuentes de ^{222}Rn son los suelos, las rocas en las que haya podido quedar atrapado y las aguas subterráneas que pueden contener sus precursores (uranio/radio) o directamente radón disuelto. El radón tiene preferencia por la fase gaseosa (Voronov, 2004) y su solubilidad en aguas depende de la temperatura, siendo su coeficiente de solubilidad inversamente proporcional a ella (Martin-Luis, 1999). Por tanto, el contenido de este gas en las aguas subterráneas depende de las características geológicas e hidrogeológicas del acuífero, de la concentración de radio en las rocas que atraviesa y de la temperatura. Los niveles de radón en las aguas subterráneas pueden ser muy altos, pero es rápidamente liberado al aire cuando las aguas subterráneas entran en contacto con las aguas superficiales. Por este motivo el radón puede ser usado como trazador en los sistemas de flujo de agua subterránea para identificar y cuantificar descargas de agua subterránea a las aguas superficiales (Skeppström y Olofsson, 2007; Schubert et al., 2011; Ortega et al., 2013) o para intentar dilucidar el tipo de rocas por las que circula la misma (Hoehn et al., 1992; Schubert et al., 2011)

En este trabajo, se han determinado los contenidos de ^{222}Rn en el acuífero noreste de Gran Canaria, (Figura 1), a partir del muestreo de aguas subterráneas realizado en el verano de 2014. El objetivo es estudiar la calidad de las aguas subterráneas con respecto al gas ^{222}Rn y hacer un primer intento de uso de este gas como trazador para establecer una dinámica de flujo de las aguas subterráneas en Gran Canaria.

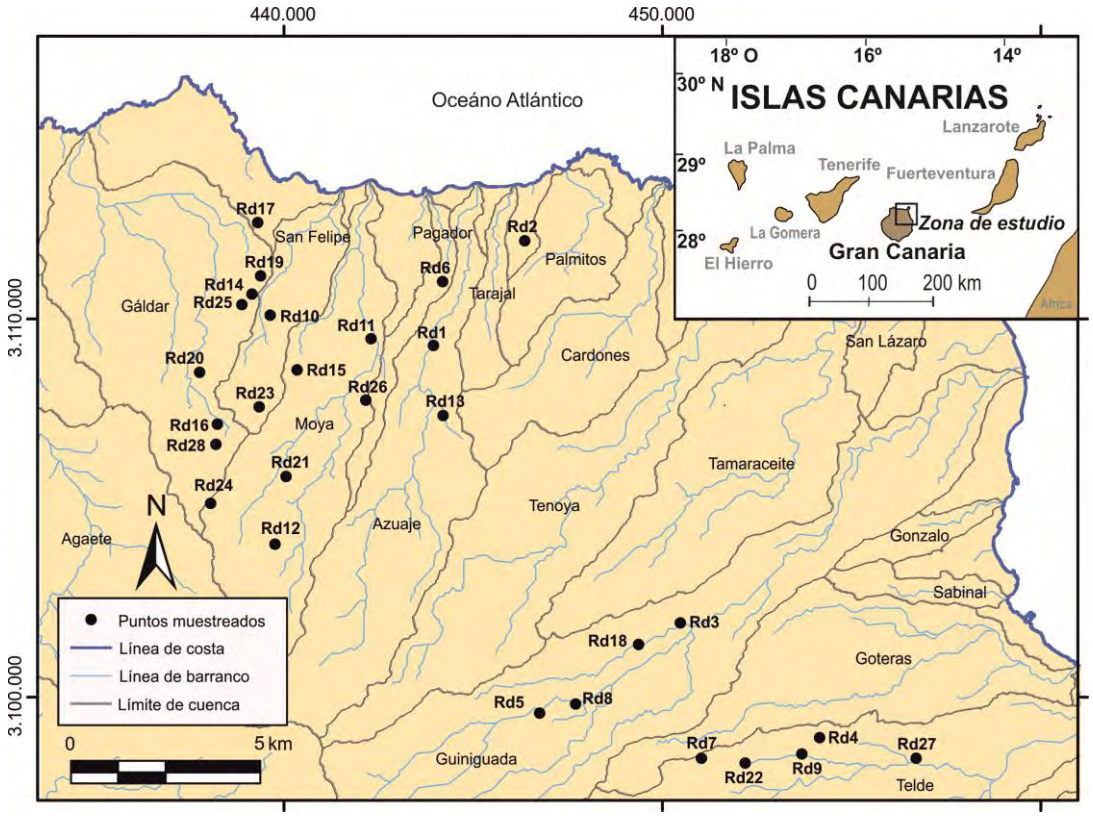


Figura 1. Localización de la zona de estudio y los puntos de muestreo de las aguas subterráneas. Los topónimos indican los nombres de los barrancos. Coordenadas en UTM WGS84 28N.

MATERIALES Y MÉTODO

El gas ^{222}Rn ha sido medido en el agua subterránea tomada en 28 pozos localizados en la zona noreste de Gran Canaria (Figura 1) en una campaña de campo llevada a cabo en el verano de 2014. Los puntos seleccionados muestran temperaturas por encima de los 25ºC y/o altas concentraciones de gases disueltos de origen volcánico. Se muestrearon 26 pozos tradicionales canarios, 1 sondeo de 200 mm de diámetro (Muestra Rd26) y un manantial (Muestra Rd1). Las profundidades de los pozos varían entre los 125 y los 600 metros por lo que explotan diversas formaciones geológicas. Las muestras de agua para medir la concentración de ^{222}Rn fueron recogidas en una botella (1L) de cristal opaco, procurando reducir al mínimo el burbujeo que comporta la pérdida de radón y eliminando las burbujas de aire de la muestra. Posteriormente, la concentración de ^{222}Rn disuelto en el agua se determinó en laboratorio en un plazo de entre 3 y 6 h desde la recogida de la muestra.

La medida de radón se ha realizado con un equipo AlphaGUARD PQ2000PRO de probada estabilidad en la calibración que ha sido constatada en numerosos estudios (Kotrappa et al., 2005). Este monitor permite la determinación del gas radón en continuo y opcionalmente la concentración de descendientes del radón. Se trata de un detector basado en una cámara de ionización de 0.65 litros de volumen activo, capaz de almacenar en memoria tanto parámetros de concentración de actividad como los valores de los principales parámetros ambientales (temperatura, humedad y presión atmosférica) durante el tiempo de medida. El procedimiento de medida se basa en la espectrometría alfa del radón y sus descendientes del aire que haya entrado en el volumen de detección de la cámara de ionización y que previamente ha sido filtrado para permitir únicamente la entrada del gas radón. Estas características hacen que presente una alta eficiencia para radón y una rápida respuesta a gradientes de concentración. El rango de medida está comprendido entre de 2 Bq/m^3 y 2×10^6 Bq/m^3. Para la medida de la concentración de radón en aguas se ha utilizado el sistema AquaKIT, de SAPHYMO (SAPHYMO, 1998), complementario de AlphaGUARD. Este sistema consta de un recipiente de 500 ml con un dispositivo de desgasificación por burbujeo en el que se introduce la muestra, una bomba de impulsión de gases (AphaPUMP) y una botella de cristal de seguridad que se conectan en circuito cerrado con el detector AlphaGUARD como se muestra en la Figura 2. Se dispone, además de un filtro de carbón activo para rebajar la concentración de radón de fondo del sistema, antes de cada medida.

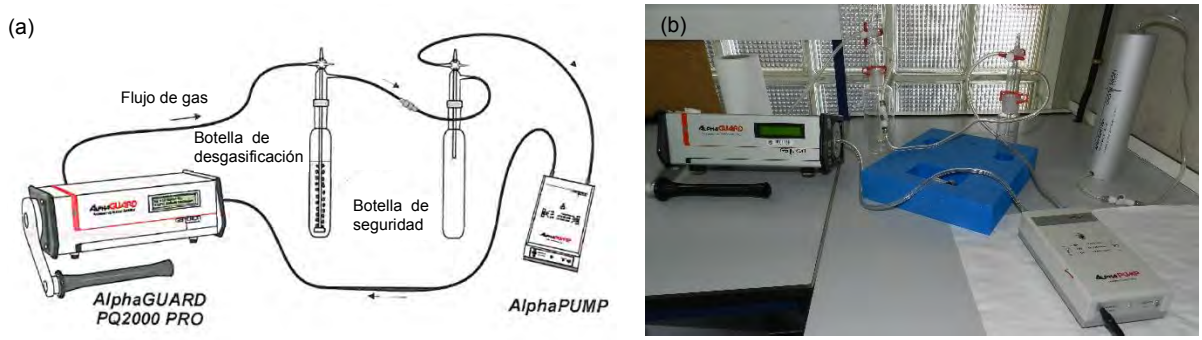


Figura 2 (a) Esquema del montaje experimental del sistema de medida de radón en agua indicando el flujo de gas radón. (b) Montaje práctico.

Siguiendo el procedimiento establecido por el fabricante (Schubert et al., 2006), el proceso de medida se inicia reduciendo la concentración de actividad de radón del detector AlphaGUARD a los niveles del laboratorio. A continuación se monta el circuito cerrado, con los recipientes de cristal vacíos, y se reduce, mediante la inserción de un filtro de carbón activo, la concentración de radón en dicho circuito. Una vez terminado este proceso, se

inyecta en el recipiente de desgasificación una cantidad aproximada de 500 ml de muestra de agua evitando su desgasificación en el proceso. Mediante la bomba AlphaPUMP se recircula el aire por el circuito cerrado, haciendo burbujear la muestra durante un tiempo de 10 min provocando la desgasificación del radón presente en la muestra. Tras esos 10 min iniciales, se apaga la bomba y se mide durante otros 20 min, obteniéndose la curva de crecimiento de radón resultante, que se descarga y analiza con el sistema de adquisición de datos DataEXPERT.

El valor medido por el detector es la concentración del radón exhalado por la muestra y diluido en el aire dentro del circuito cerrado. Por lo tanto, para determinar la concentración de actividad de radón en la muestra de agua, es necesario cuantificar el efecto de la dilución en todo el volumen de aire dentro del sistema. Para ello se utiliza la siguiente ecuación (SAPHYMO, 2007):

$$C_{agua} = \frac{C_{aire} x \left(\frac{V_{sistema} - V_{muestra}}{V_{muestra}} + k \right) - C_0}{1000}$$

donde C_{agua} es la concentración de actividad de radón en la muestra de agua en Bq/L, C_{aire} es la concentración de actividad de radón en aire Bq/m^3 medido por el AlphaGUARD y C_0 es la concentración inicial de actividad de radón en el sistema de medida, $V_{sistema}$ es el volumen interior del sistema de medidas y $V_{muestra}$ es el volumen de la muestra de agua, y k es un coeficiente semiempírico de difusión recomendado por el fabricante que tiene en cuenta la relación de concentración entre la fase acuosa y el volumen de aire del sistema y es función de la temperatura según la expresión $k(T) = 0.105 + 0.405e^{0.502T(^{o}C)}$ (Correa et al., 2011).

Una vez medidas todas las muestras, se almacenaron en sus recipientes de cristal, con el objetivo de volver a medir su contenido en radón, transcurrido el tiempo necesario para que el ^{226}Ra alcance el equilibrio secular con sus descendientes con el fin de determinar si el origen del radón en la muestra de agua ha sido su absorción directa del entorno, o se genera a partir del ^{226}Ra que pudiera estar disuelto en la misma.

CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS, HIDROGEOLÓGICAS E HIDROQUÍMICAS

La geología de Gran Canaria tiene su origen en el vulcanismo intraplaca de punto caliente (Carracedo et al., 2002), definiéndose tres etapas de evolución: juvenil (14,5-8,0 millones de años o Ma), inactividad volcánica (8,0-5,0 M.a.) y rejuvenecimiento (desde 5,0 Ma a la actualidad) (Pérez-Torrado, 2008). En la zona de estudio afloran lavas e ignimbritas de los ciclos Roque Nublo y Post Roque Nublo, pertenecientes a la etapa de rejuvenecimiento, y sedimentos de la Formación Detrítica de las Palmas y depósitos aluviales de la etapa de inactividad volcánica (Figura 3). La geología profunda revela que en la zona se explotan fundamentalmente los materiales del ciclo Roque Nublo y los materiales fonolíticos-traquíticos infrayacentes de edad Pliocena y Miocena respectivamente, pertenecientes a la etapa juvenil y que afloran en las zonas costeras y fondos de barranco.

El funcionamiento hidrogeológico de Gran Canaria se caracteriza por la existencia de un acuífero único insular, con una superficie piezométrica en forma de domo que alcanza máximos en el centro de la isla. La recarga natural se produce por infiltración de la lluvia en las zonas de cumbre y medianías, circulando preferentemente por los materiales volcánicos superficiales más recientes. La descarga se produce al mar y por las extracciones de pozos y galerías, que han ido sustituyendo a las descargas naturales intermedias por manantiales

(nacientes) que existían donde afloran materiales menos permeables o en valles profundos (SPA-15, 1975; Custodio, 1978; Custodio y Cabrera, 2008). En este marco hidrogeológico, las aguas subterráneas de la zona de estudio conforman la parte septentrional del acuífero insular, fluyendo desde el sur hacia el norte-noreste. La recarga procede principalmente de la precipitación y retornos de riego en la zona costera. La descarga se produce hacia el mar y por extracciones en pozos y galerías (Cruz-Fuentes et al., 2012).

La salinidad de las aguas subterráneas crece desde la cumbre a la costa. Las aguas son principalmente bicarbonatadas magnésico cálcicas y cloruradas magnésico cálcicas asociadas a la litología. En la costa aparecen aguas sulfatadas sódicas debido a los retornos de riego (SPA-15, 1975).

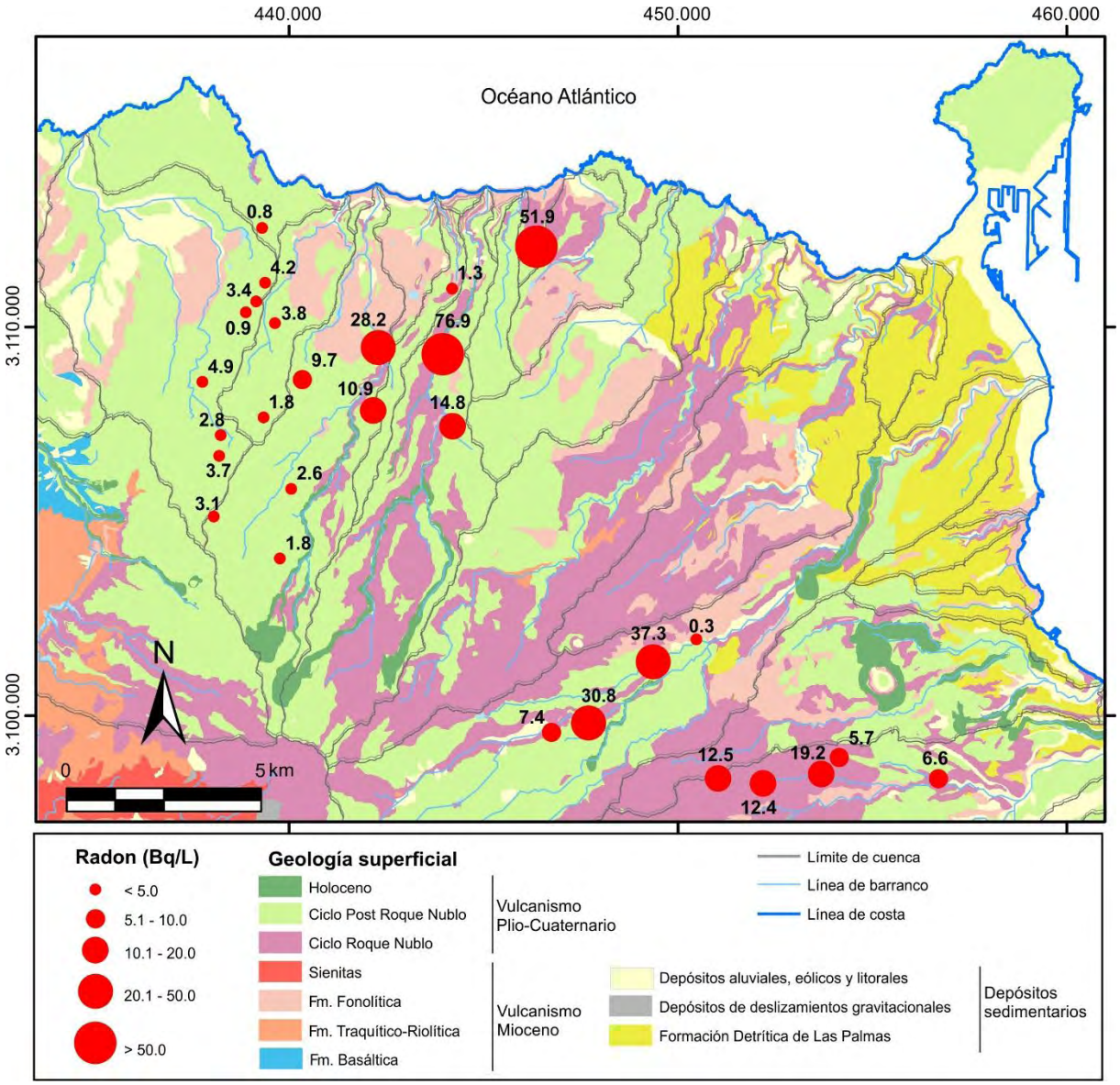


Figura 3. Geología superficial de la zona de estudio. Se muestra los resultados de las concentraciones de ^{222}Rn. Coordenadas en UTM WGS84 28N.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se muestran los resultados de concentración actividad de ^{222}Rn en agua en los distintos puntos de muestreo. Los valores obtenidos varían en un rango de 0.3 a 76.9 Bq/L, con media de 12.8 Bq/L, mediana de 5.3 Bq/L y desviación standard de 17.7 Bq/L. La situación espacial se recoge en la Figura 3. La gran mayoría de los puntos con valores mayores a 10 Bq/L se localizan en pozos emboquillados en los materiales del Ciclo Roque Nublo, aunque la mayoría tiene el fondo en las Fonolitas Miocenas infrayacentes.

Tabla 1. Concentraciones de ^{222}Rn en los puntos muestreados de agua subterránea con las incertidumbres asociadas.

Punto de agua	Topónimo	Cota (m snm)	Profundidad (m snm)	Cota del fondo (m snm)	[^{222}Rn] (Bq/L)	Incertidumbre (Bq/L)
Rd1	Fuente Santa (manantial)	235	0	235	76.9	8.3
Rd2	Los Lentiscos	108	150	-42	51.9	8.9
Rd3	Puente Meleguinas	430	176	254	0.3	0.3
Rd4	García Ruíz	354	192	162	5.7	1.9
Rd5	Manchones de la Umbría	725	151	574	7.4	3.7
Rd6	Lomo Blanco	235	123	112	1.3	1.0
Rd7	San Isidro	679	290	389	12.5	3.1
Rd8	El Draguillo	603	340	263	30.8	6.4
Rd9	El Albercón	345	150	195	19.2	4.6
Rd10	Los Paredones	515	360	155	3.8	2.4
Rd11	Huerta del Palmital	377	125	252	28.2	6.1
Rd12	El Cavadero	996	450	546	1.8	1.0
Rd13	Cuevas de Matos	499	200	299	14.8	4.1
Rd14	Ávalos	452	400	52	0.9	0.8
Rd15	Barranquillo Frío	620	315	305	9.7	2.6
Rd16	Las Cuevas	740	280	460	2.8	1.2
Rd17	Doña Ana	260	170	90	0.8	0.8
Rd18	El Barranquillo	523	230	293	37.3	8.1
Rd19	Llano de la Plata	420	372	48	4.2	1.9
Rd20	Alguacilejo	625	400	225	4.9	1.7
Rd21	Hoya de las Madres	810	302	508	2.6	1.4
Rd22	Higuera Negra	481	143	338	12.4	3.3
Rd23	San Antonio	750	608	142	1.8	0.9
Rd24	Morente II	1050	540	510	3.1	1.4
Rd25	La Fuente	445	340	105	3.4	1.5
Rd26	San Fernando	598	394	204	10.9	2.8
Rd27	Las Cabras	182	150	32	6.6	2.5
Rd28	El Marqués	827	355	472	3.7	1.5

Se observa que los valores de ^{222}Rn se agrupan en dos zonas diferenciadas: una zona con valores menores de 10 Bq/L hacia el oeste y otra zona con valores mayores (alcanzando los 76.9 Bq/L) coincidiendo con las zonas medias y bajas de los Barrancos de Moya y Azuaje, donde han existido aguas termales. En los Barrancos de Guiniguada y

Telde, aparecen valores medios.

Las muestras de agua se almacenaron durante dos meses, garantizando que el radón disuelto en ellas se encontraba en equilibrio secular con su precursor, el ^{226}Ra. Transcurrido este tiempo se repitió el proceso de medida antes descrito. Los valores de actividad de radón en el aire del sistema de medida, para las muestras, no superaron los 200 Bq/m^3, obteniéndose valores de actividad de radón en agua siempre inferiores a 1 Bq/L, lo que indica que el radón obtenido en la primera medida tenía su origen en la absorción directa del gas desde las formaciones geológicas por las que discurren las aguas. Datos de los estudios hidrogeoquímicos y geoquímicos de las rocas por las que circula el agua en curso permitirán precisar el papel de estos fenómenos sobre las variaciones de radón observadas.

CONCLUSIONES

Las concentraciones de ^{222}Rn del norte de Gran Canaria varían en un rango de 0.3 a 76.9 Bq/L, siendo todas inferiores al nivel recomendado para el radón disuelto en agua de consumo humano (Comisión Europea, 2013). La repetición de las medidas de radón en las muestras de agua, transcurrido dos meses, que garantizan el equilibrio secular entre el ^{222}Rn y su padre, el ^{226}Ra, a falta de un análisis más exhaustivo, permite concluir que no se encuentra ^{226}Ra disuelto en el agua subterránea analizada.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se enmarca dentro del proyecto REDESAC (CGL2009-12910-C03-02) del Ministerio de Ciencia e Innovación. Parte del equipamiento utilizado ha sido financiado por el Consejo de Seguridad Nuclear en sus convocatorias de proyectos de I+D 2009 y 2012 y por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) mediante un proyecto de investigación (PI2007_035) concedido por Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información del Gobierno de Canarias en su convocatoria del año 2007.

REFERENCIAS

SAPHYMO, AquaKIT user manual. *Accesory for radon water measurement in combination with the radon monitor AlphaGUARD*. 2007.

Carracedo, J.C.; Pérez Torrado, F.J.; Ancochea, E.; Meco, J.; Hernán, F.; Cubas, C.R.; Casillas, R.; Rodríguez Badiola, E. y Ahijado, A. (2002): *Cenozoic volcanicsm II: The Canary Islands.* En: The Geology of Spain (W. Gibbons and T. Moreno eds.). The Geological Society of London, 439–472.

Correa, J.N., Paschuck, S. A., Perna, A., Kappke, J., Del Claro, F., Denyak, V., Schelin, H., Rocha, Z. (2011). *Radon and radium measurement in well water at Curitiba (Pr), Brazil*. INAC 2011 (International Nuclear Atlantic Conference). October 24-28.

Cruz-Fuentes, T., Benavides, A., Naranjo, G., Cabrera, M.C., Hernández-Quesada, M.P., Estévez, E., Martín, L.F., y Custodio, E. (2012). *Estimación de la recarga natural en la zona Noreste del acuífero insular de Gran Canaria (Islas Canarias, España) mediante el balance de cloruros atmosféricos.* En Lambán, L.J., Carceller, T., Valverde M. y Fernández-Jaúregui, C. (eds): Las Aguas Subterráneas: Desafíos de la Gestión para el Siglo XXI. Asoc. Intern. Hidrogeólogos – Grupo Español.

Custodio, E. (1978). *Geohidrología de terrenos e islas volcánicas.* Centro de Estudios Hidrográficos. Publ. 128, MOPU. Madrid: 1-303

Custodio, E. y Cabrera, M.C. 2008. *Síntesis de la hidrogeología de las Islas Canarias*. Geo-Temas. Vol. 10. 785-788.

Comisión Europea (2013). Commission Recommendation of 22 october 2013 on laying down requirements for the protection of the health of the general public with regard to radioactive substances in water intended for human consumption. Official Journal L 296/12, 2013/51/Euratom.

Hoehn, E., Von Gunten, H.R., Stauffer, F., Dracos, T. (1992). *Radon-222 as a groundwater tracer.* A laboratory study. Environmental Science & Technology, 26(4): 734–738.

Hopke, P. (1987). *The indoor radon problem explained for the layman.* En: Hopke P, ed. Radon and its decay products. Washington, DC. American Chemical Society, 572-586.

Kotrappa, P., Sieff, L.R., Volkovoitsky, P. (2005). *Radon monitor calibration using NIST radon emanation standards steady flow method*. Radiation protection dosimetry, 113(1).

Martin-Luis, M. C. (1999). *Variación espacio-temporal del nivel de emisión de radón en una zona volcánica activa: Tenerife (Islas Canarias)*. Tesis doctoral, Universidad de La Laguna, 264 pp.

Ortega, L., Hornero, J. y Manzano, M. (2013). Aplicación del ^{222}Rn para identificar y cuantificar descargas de agua subterránea en el río Mundo (Albacete, España). En González, N., Kruse, E.E., Trovatto, M.M., Laurencena, P. (eds): Temas Actuales en Hidrología Subterránea. Editorial de la Universidad de La Plata (Edulp). La Plata, Argentina.

Pérez-Torrado, F.J. (2008). *Geología de Gran Canaria.* En: F.J. Pérez-Torrado, y M.C. Cabrera, (eds.): Itinerarios geológicos por las Islas Canarias. Gran Canaria. Sociedad Geológica de España, Geo-Guías, 5: 27-39.

SAPHYMO*. AlphaGUARD portable radon monitor user manual*. 1998.

Schubert, M., Buerkin, W, Peña, P., López, A.E., Balcázar, M. (2006). *On-site determination of the radon concentratiom in water samples: Methodical background and results from laboratory studies and a field-scale test*. Radiation Measurements, 41, 492-497.

Schubert, M., Brueggemann, L., Knoeller, K., Schirmer, M. (2011). *Using radon as an environmental tracer for estimating groundwater flow velocities in single well tests*. Water Resources Research, 47, W03512.

Skeppström, K., Olofsson, B. (2007). *Uranium and radon in ground water*. European Water, 17/18: 51-62.

SPA-15, (1975). *Estudio científico de los recursos de agua de las Islas Canarias* (D. Fernandopullé, S. Sáenz–Oiza, R. Heras, A. Sahuquillo, E. Custodio, eds.) UNESCO–DG Obras Hidráulicos. Las Palmas de Gran Canaria/Madrid. 4 Vols.

Voronov, A. N. (2004). *Radon-rich waters in Russia.* Environmental Geology, 46, 630-634.

ISBN: 978-84-938046-4-0

HIDROGEOLOGÍA DE LOS NACIENTES DE ABINQUE (ADEJE, SUR DE TENERIFE). PRIMEROS RESULTADOS

Juan Jesús COELLO BRAVO[1], Ricardo BALCELLS HERRERA[1], Isabel FARRUJIA DE LA ROSA[1], Cecilia GARCÍA REINO[1], José FERNÁNDEZ BETHENCOURT[1]

[1] Consejo Insular de Aguas de Tenerife. C/Leoncio Rodríguez, 3, 1ª planta, 38003 Santa Cruz de Tenerife, España. juanjc.cia@cabtfe.es; rbalcells.cia@cabtfe.es; ifarrujia.cia@cabtfe.es; cgarcia.cia@cabtfe.es; jfernandez@aguastenerife.org

RESUMEN

Los nacientes de Abinque son surgencias de aguas subterráneas de gran importancia ecológica localizadas entre las cotas 680 y 720 m snm, al pie de las profundas paredes, de alturas superiores a 400 m, que constituyen los márgenes del Barranco del Infierno (Adeje, Tenerife) en su tramo medio. Los nacientes drenan un acuífero multicapa formado por materiales volcánicos de edad 1,9-1,3 Ma, pertenecientes al Edificio Cañadas II, que se disponen subhorizontalmente rellenando una paleo-depresión excavada en las lavas y piroclastos de permeabilidad reducida del Edificio Roque del Conde, un escudo basáltico muy erosionado de edad 12-9 Ma. Dicho acuífero multicapa puede considerarse el acuífero general o profundo de este sector del sur de Tenerife. Los aforos disponibles se remontan hasta 1912 y aunque son de difícil interpretación, muestran una clara tendencia de descenso del caudal de los nacientes desde 35-50 L/s hasta los 1,0-4,5 L/s que producen en la actualidad. La disminución de caudal en este periodo debe haberse producido tanto por un posible descenso de pluviosidad en la zona de recarga de los nacientes como por la explotación del acuífero multicapa por algunas captaciones de aguas subterráneas próximas.

Palabras clave: *Hidrogeología, Nacientes de Abinque, Barranco del Infierno, Tenerife.*

ABSTRACT

The Nacientes de Abinque are a group of springs of great ecological importance located between 680 and 720 m asl at the foot of the deep walls, exceeding 400 m in height, which confine the Barranco del Infierno canyon (Adeje, Tenerife) in its medium course. These springs drain a multilayer aquifer composed of volcanic materials 1.9 to 1.3 Myr old, belonging to the Cañadas II volcanic edifice, which fill a paleo-depression excavated into the low permeability lavas and pyroclastic deposits of Roque del Conde edifice, an eroded basaltic shield 12-9 Myr old. That aquifer can be considered the general or deep one in this area of southern Tenerife. Historical flow measurements are available since 1912, and although difficult to interpret, they show a clear downward trend in the flow from 35 to 50 L/s to the 1.0 to 4.5 L/s gauged today. The decrease in flow during this period must have been caused by the potential decline in rainfall in the recharge area of the springs and the exploitation of the multilayer aquifer by some nearby water galleries and deep wells.

Keywords: *Hydrogeology, Nacientes de Abinque, Barranco del Infierno, Tenerife.*

INTRODUCCIÓN

En el año 2009, la Comunidad de Regantes "Heredad de Aguas de Adeje" comunicó al Consejo Insular de Aguas de Tenerife que a su juicio, el caudal de las fuentes del Barranco del Infierno o Nacientes de Abinque, aprovechado por dicha comunidad desde 1932, había sufrido una importante merma, y solicitó que se adoptaran medidas de protección. Por ello, en el marco de los trabajos previos a la revisión del Plan Hidrológico de la isla, se realizó un estudio hidrogeológico de los nacientes, a los efectos de su adecuada protección hidrológica.

Los Nacientes de Abinque son un recurso hídrico de especial importancia ecológica, ya que sustentan un curso de agua permanente al que se asocia un ecosistema ripario e hidrófilo de fondo de barranco; tales ecosistemas se hallan en franca regresión en el sur de la isla de Tenerife y en general en todo el Archipiélago Canario (Gobierno de Canarias, 2004). Por ese motivo los nacientes están protegidos ambientalmente mediante su inclusión en la Reserva Natural Especial del Barranco del Infierno (T-8).

Los resultados más relevantes del estudio realizado, que debe completarse con trabajos posteriores, se resumen a continuación.

SITUACIÓN. MARCO GEOLÓGICO Y CLIMÁTICO

Los Nacientes de Abinque se hallan en el municipio de Adeje, al sur de la isla de Tenerife (Figura 1), en el límite nororiental de afloramiento del denominado Macizo de Adeje o Edificio Roque del Conde, un edificio volcánico en escudo de composición basáltica y edad miocena. Este edificio, cuya área actual de afloramiento es de unos 25 km^2, se eleva hasta una cota máxima de 1109 m (Roque de los Brezos). Se halla en un estadio erosivo intermedio, incidido por profundos barrancos que discurren de NE a SO y generan una abrupta orografía, caracterizada por fuertes pendientes que superan el 60% en la mayor parte del macizo.

Al NE del Edificio Roque del Conde y en discordancia erosiva sobre él, se dispone el flanco sur de un edificio volcánico más moderno, el Edificio Cañadas, de geometría cupuliforme y carácter poligénico. El relieve en rampa de dicho flanco asciende progresivamente hasta el borde de la Caldera de las Cañadas, situado a unos 8 km al NNE, a una cota aproximada de 2500 m.

Al estar situada al sur de la isla, la zona en la que se emplazan los nacientes no está bajo la influencia directa de los vientos alisios, por lo que el clima se caracteriza por la escasez de precipitaciones (~290 mm de precipitación anual media en el periodo 2000-2009) y una alta insolación. Sin embargo, el desnivel del Edificio de Roque del Conde y su abrupta orografía provocan variaciones notables en esos parámetros, así como en las condiciones de humedad y temperatura. El régimen pluviométrico es estacional y muestra una acusada variabilidad interanual. Las lluvias suelen producirse en el periodo comprendido entre octubre y marzo (ambos inclusive), mientras que de mayo a agosto las condiciones son de casi total sequía. Las precipitaciones más significativas se registran durante las grandes borrascas del SO.

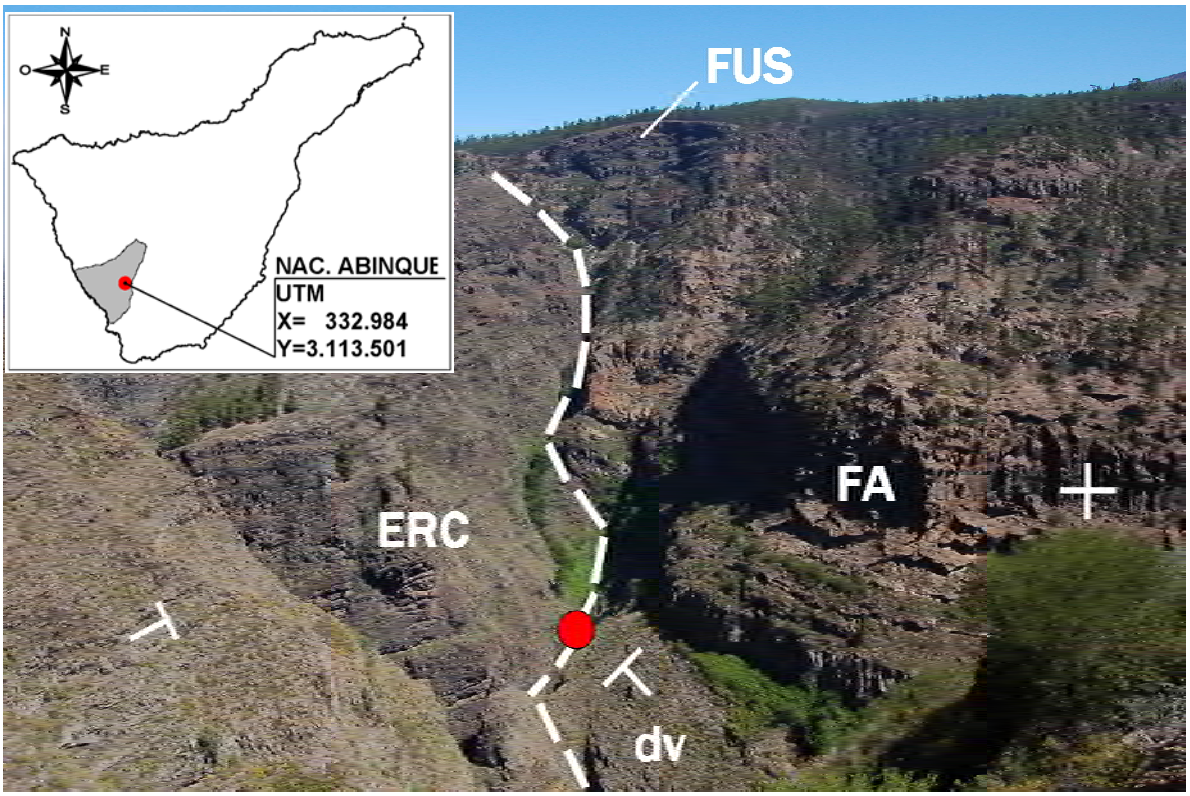


Figura 1. Traza del paleo-escarpe (línea discontinua) excavado en los materiales del Edificio Roque del Conde (ERC), en la zona del Roque de Abinque –cuya cima se sitúa a la izquierda de la fotografía– vista desde el margen izquierdo del Barranco del Infierno. Los materiales del Edificio Cañadas II se apoyan horizontalmente contra el paleo-escarpe: FA-Formación Abinque; FUS-Formación Ucanca Superior; dv-depósitos de vertiente con elevados ángulos de reposo hacia el N. El punto rojo señala la posición aproximada de los Nacientes de los Chorros en el Barranco de Calderón. Los nacientes prinicipales o Nacientes del Agua no son visibles en esta fotografía.

GEOLOGÍA

Edificio Roque del Conde

Constituye los terrenos situados al SO de los nacientes. Es un escudo basáltico cuya edad, según Guillou et al. (2004), está comprendida entre 12 y 9 Ma (millones de años). Está formado por un apilamiento, de potencia emergida total superior a los 1000 m, de coladas de lavas basálticas de morfología "pahoe-hoe" y "aa" y piroclastos basálticos subordinados que forman conos enterrados de dimensiones variables. El buzamiento general de estos materiales, en el área de los nacientes, es pequeño a moderado (10-15º) hacia el sur o suroeste. Las lavas y piroclastos están atravesados por diques, que en la zona de los nacientes muestran una dirección N20ºE-N40ºE.

Algunos autores (Barrera y García, 2011) han postulado la posible ocurrencia de grandes deslizamientos gravitacionales que afectaron al edificio, pero sin concretar su número, geometría o edad. En el presente estudio se ha reconocido una estructura, que Fúster et al. (1994) interpretaron como una falla normal, cuyo origen podría ser un colapso gravitacional de flanco (Figuras 1 y 2). Se trata de un paleo-relieve en forma de antigua pared acantilada, que limita el edificio por el NE y cuya cresta alcanza la máxima cota en el Roque de los Ratiños y en el Roque de Abinque (~1030 m snm). La estructura aflora a lo largo de más de 3 km en dirección N30ºO entre los sectores de Roque de Imoque (SE) y Roque de los

Ratiños (NO). Más al oeste de ese último sector ya no es posible seguirla en superficie, pues está cubierta por completo por materiales del Edificio Cañadas. Tampoco es atravesada en el subsuelo por las galerías de esa zona, que discurren más altas, con la posible excepción de la galería "Aguas de Taucho" (Figura 2). Sin embargo, la disposición horizontal de los materiales del Edificio Cañadas en los subsuelos sugiere que podría hallarse inmediatamente al norte del frente de la traza de la galería "Vera de la Lajita" (Figura 2).

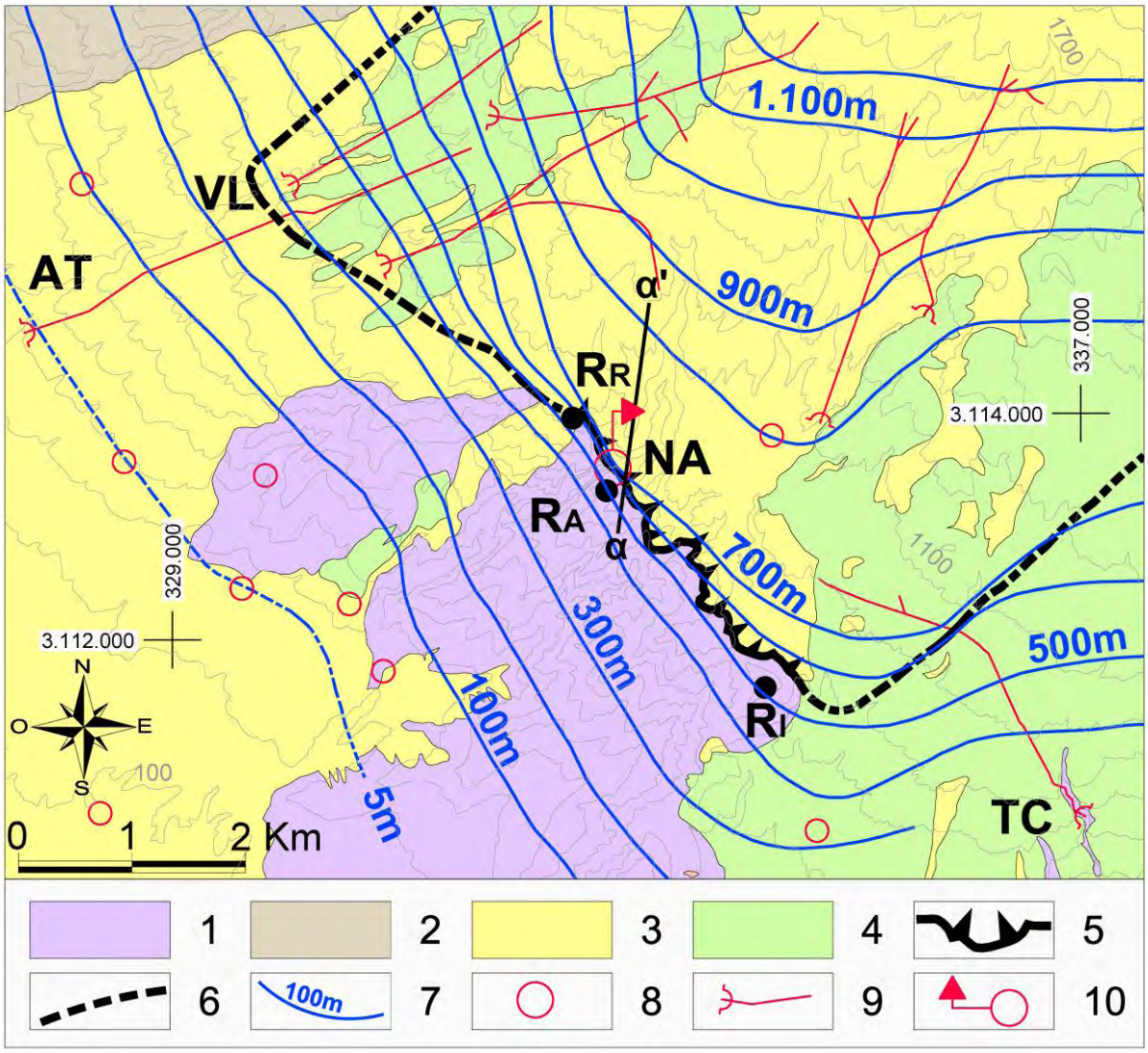


Figura 2. Mapa hidrogeológico general del área de los Nacientes de Abinque. Equidistancia de las curvas de nivel: 100 m. 1-Edificio Roque del Conde; 2-Formación El Cedro (Edificio Cañadas I); 3-Formación Abinque y Formación Ucanca Superior (Edificio Cañadas II); 4-Lavas y piroclastos subrecientes y recientes de la Dorsal Sur; 5-Traza del paleo-escarpe excavado en el Edificio Roque del Conde aflorante en superficie; 6-Traza del paleo-escarpe en el subsuelo (supuesta excepto en su intersección con la traza de la galería Topo y Chija); 7-Isopiezas (cota en m snm); 8-Pozos/pozos-sondeo; 9-Galerías; 10-Nacientes. AT-Galería Aguas de Taucho; NA-Nacientes de Abinque; R_A-Roque de Abinque; R_I-Roque de Imoque; R_R-Roque de los Ratiños; TC-Galería Topo y Chija; VL-Galería Vera de la Lajita.

Por el E, esta antigua pared está también cubierta por materiales del Edificio Cañadas, pero es atravesada en el subsuelo por la traza principal de la galería "Topo y Chija", emboquillada a cota 681 m snm, a los 2100 m de la entrada o bocamina; su dirección en la

galería es NE-SO, aproximadamente perpendicular a la dirección del tramo aflorante en Abinque (Figura 2). La coronación o cresta de la paleo-pared debe hallarse en esta misma zona por debajo de la cota 750 m, ya que las galerías situadas por encima de esa cota no la intersectan.

Edificio Cañadas

La antigua depresión delimitada por el paleo-escarpe excavado en el flanco oriental del Edificio Roque del Conde fue completamente rellenada por productos volcánicos del Edificio Cañadas, una gran estructura volcánica cupuliforme originada en múltiples erupciones centrales y de flanco, que constituye la porción central, la de mayor relieve, de la isla de Tenerife. Siguiendo a Fúster et al. (1994) y Huertas et al. (2002), la mayor parte de los materiales de relleno pueden incluirse en dos formaciones pertenecientes al Edificio Cañadas II (~2,3-1,3 Ma): la Formación Abinque, de nueva definición y aproximadamente equivalente a la Formación Adeje de Ancochea et al. (1999), y la Formación Ucanca Superior de esos mismos autores (Figura 1).

Los materiales de relleno más antiguos aflorantes son depósitos de vertiente: coluviones, piedemontes, avalanchas rocosas y flujos de escombros que se apoyan sobre la paleo-pared con ángulos de reposo de ~45ºN (Figura 1). Su espesor real visible es de unos 80 m, y alcanzan una cota máxima de 850 m snm en el margen izquierdo del Barranco de Infierno, bajo el Roque de Abinque. Depósitos de vertiente análogos se atraviesan en el subsuelo en la galería "Topo y Chija", también discordantes sobre el antiguo escarpe vertical intersectado por la galería y con ángulos de reposo similares.

Sobre ellos se dispone una secuencia de espesor visible superior a los 400 m, constituida por aluviones, lavas basálticas y fonolíticas y depósitos piroclásticos sálicos: pómez y cineritas de caída y potentes ignimbritas, muchas de las cuales aparecen litificadas por procesos de alteración de la matriz vítrea y los fragmentos juveniles. Algunas de ellas pueden correlacionarse tentativamente con las ignimbritas descritas por Huertas et al. (2002) y Dávila-Harris (2009) en zonas próximas del Edificio Cañadas. Todos estos materiales se disponen horizontalmente, apoyados contra la antigua pared del Edificio Roque del Conde. No se han observado diques en ellos.

HIDROGEOLOGÍA

Los nacientes constituyen un numeroso grupo de surgencias de las que solo se inventariaron las de mayor caudal. Las principales, denominadas Nacientes del Agua, se localizan en el tramo del cauce del Barranco del Infierno comprendido entre dos grandes saltos verticales, entre las cotas 680 m y 715 m, aproximadamente. Estos nacientes, junto con otros denominados Nacientes de los Chorros (Figura 1), situados a la misma cota en el cauce del Barranco de Calderón, afluente occidental del Barranco del Infierno, se hallan en el contacto entre los materiales del Edificio Roque del Conde y los materiales del Edificio Cañadas II que rellenan la paleo-depresión antes comentada. En concreto se sitúan en el punto en que dicho contacto, que se corresponde con el antiguo escarpe excavado en el Edificio Roque del Conde, aflora en superficie a menor cota debido a la incisión causada por el Barranco del Infierno (Figura 3).

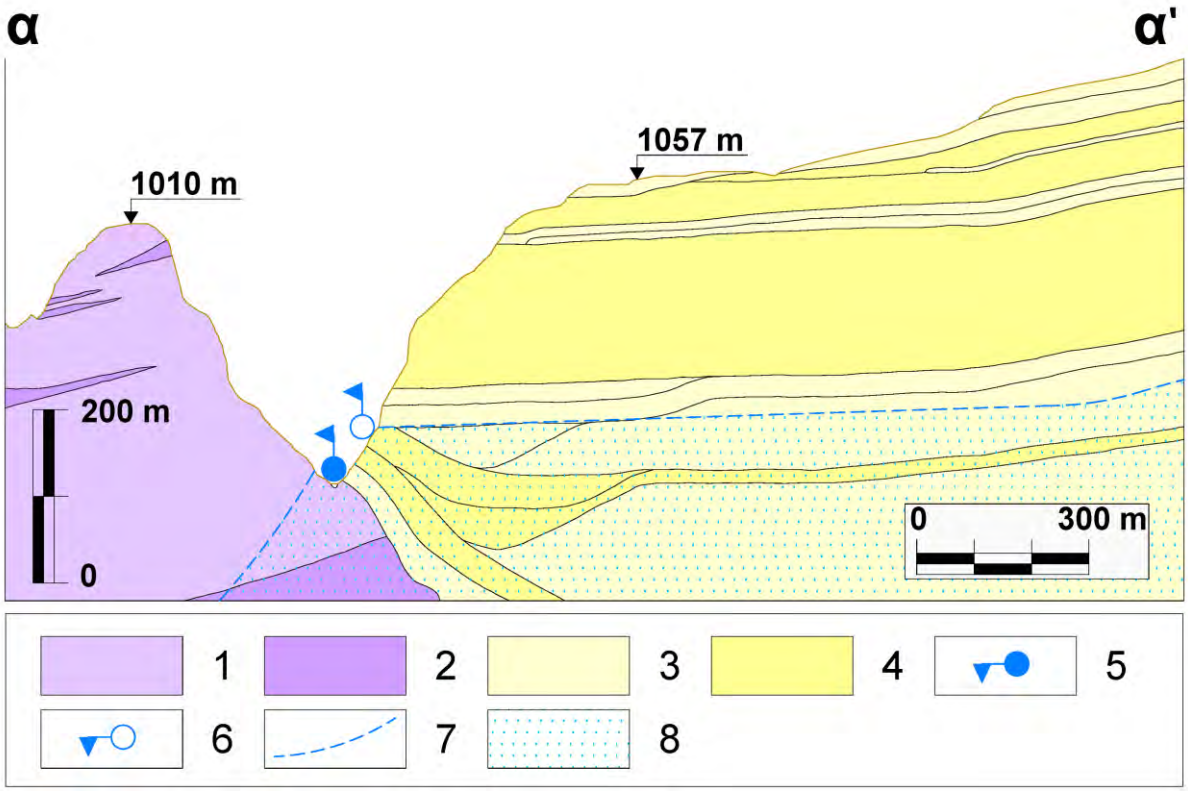


Figura 3. Corte hidrogeológico esquemático de los Nacientes de Abinque (véase la Figura 2 para la localización del corte). 1-Materiales de baja permeabilidad del Edificio Roque del Conde; 2-Materiales de muy baja permeabilidad del Edificio Roque del Conde; 3-Materiales permeables del Edificio Cañadas; 4-Materiales de baja permeabilidad del Edificio Cañadas; 5-Nacientes principales; 6-Nacientes secundarios situados a mayor cota; 7-Superficie freática; 8-Zona saturada del acuífero multicapa que alimenta a los nacientes.

No se dispone de datos cuantitativos directos sobre las características hidrogeológicas de los materiales presentes en la zona de las surgencias, pero a partir del examen cualitativo de sus características litológicas y texturales, de la hidráulica de algunas captaciones que alumbran agua en ellos, y por lo publicado respecto a materiales análogos en Canarias y otros territorios volcánicos (p.ej. Smyth and Sharp, 2006; Custodio, 2007), se deduce que debe existir una diferencia o contraste general de permeabilidad entre los materiales volcánicos constituyentes del Edificio Roque del Conde y los del Edificio Cañadas.

Debido a tal contraste, el paleo-escarpe excavado en los materiales menos permeables del Edificio Roque del Conde actúa en el subsuelo como barrera al flujo de aguas subterráneas, que se verifica de cumbre a mar en dirección S-SO en esta zona de la isla, a través de las capas horizontales permeables del Edificio Cañadas II (lavas, depósitos de lluvias de pómez, etc.), intercaladas entre las capas de tobas sálicas (ignimbritas), de permeabilidad más reducida; esas capas permeables constituyen el acuífero principal que alimenta a los nacientes, un acuífero por tanto estratificado o multicapa. El efecto de esta barrera parece ser el de represar el agua circulante por dichos niveles, lo que produce una sobreelevación local de la superficie freática y una desviación del flujo hacia el SE. Los nacientes de Abinque surgen donde la intersección entre esta barrera hidráulica y la superficie del terreno se halla a menor cota. (Figura 3).

La geometría de la superficie freática que se deduce de la posición de los alumbramientos de todas las captaciones productivas próximas (Figura 2), y los gradientes hidraúlicos que de ella se infieren, son coherentes con este modelo y sugieren que la capa

freática que alimenta los nacientes de Abinque no constituye un acuífero colgado, sino que forma parte del acuífero profundo o general del sector.

Evolución del caudal

Las noticias históricas existentes indican que en la época de la conquista de la isla y la inmediatamente posterior (siglos XV-XVI), los nacientes alimentaban un curso de agua permanente, el llamado Río Grande de Adeje, de caudal desconocido pero presumiblemente importante, no solo por su nombre sino porque el agua desembocaba en el mar tras circular unos 8 km por el cauce del Barranco del Infierno; su corriente, además, se consideraba bastante para mover uno o varios ingenios de azúcar (Báez Hernández, 2010). Sin embargo, los aforos disponibles, que se remotan hasta 1912, son relativamente escasos y se distribuyen de manera muy irregular en el tiempo (Figura 4).

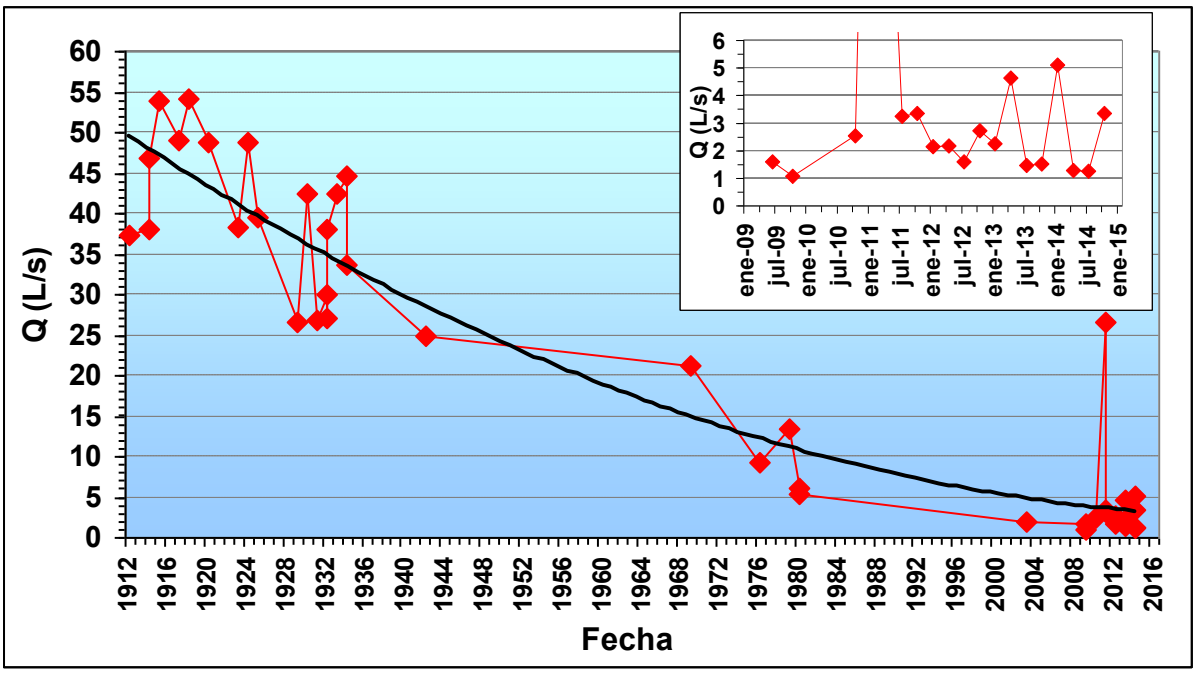


Figura 4. Evolución histórica del caudal de los Nacientes del Barranco del Infierno (1912-2014). La línea negra indica la tendencia de descenso, ajustada a una regresión polinómica de segundo grado (R^2=0,8898).

Aunque en conjunto muestran una clara tendencia de descenso de caudal (Figura 4), estos aforos son de difícil interpretación, ya que las mediciones se refieren a la totalidad del agua que discurre por el Barranco del Infierno en un punto denominado La Cogedera y situado unos 1150 m aguas abajo de los Nacientes de Abinque, en donde existe un tomadero con una capacidad de derivación máxima actual de ~200 pp/h (26,67 L/s). Por tanto, en ocasiones el caudal aforado no procede exclusivamente de los Nacientes de Abinque y de otros de menor cuantía situados en tramos más altos del barranco, sino también de aguas de escorrentía circulantes por el cauce tras fuertes lluvias.

En todo caso, la disminución observada debe haberse producido tanto por el posible descenso pluviométrico registrado en la zona de recarga de los nacientes desde los años 40 del siglo pasado en adelante (Braojos et al., 2006), como por el drenaje de los niveles saturados del acuífero multicapa que los alimenta por parte de algunas captaciones de aguas subterráneas (pozos y galerías) situadas en las proximidades. Dichas captaciones suman en la actualidad un caudal conjunto de ~80 L/s (600 pp/h).

REFERENCIAS

Ancochea, E., Huertas, M.J., Cantagrel, J.M., Coello, J., Fúster, J.M., Arnaud, N. and Ibarrola, E. (1999). *Evolution of the Cañadas edifice and its implications for the origin of the Cañadas Caldera-Tenerife, Canary Islands.* Journal of Volcanology and Geothermal Research 88: 177-199.

Báez Hernández, F. (2010). *La organización económica de las bandas del sur de Tenerife a comienzos del siglo XVI: Abona y Adeje, unos términos muy lejanos.* En: II Jornadas de Historia del Sur de Tenerife, Arona, julio de 2009. Ayuntamiento de Arona: 69-99.

Barrera, J.L. y García, R. (2011). *Mapa geológico de Canarias*. GRAFCAN. S/C de Tenerife (memoria general y planos).

Braojos, J.J., Farrujia, I. y Fernández, J. (2006). *Los recursos hídricos en Tenerife frente al cambio climático*. En: III Congreso de ingeniería civil, territorio y medio ambiente, Zaragoza, 25-27 de octubre de 2006. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Asociación de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Custodio, E. (2007). *Groundwater in volcanic hard rocks.* In: Krásný, J. and Sharp, J.M. (eds.) Groundwater in fractured rocks. IAH Selected Papers on Hydrogeology 9. Taylor and Francis, London: 95-108.

Dávila-Harris, P. (2009). *Explosive ocean-island volcanism: the 1.8-0.7 Ma explosive eruption history of Cañadas volcano recorded by the pyroclastic successions around Adeje and Abona, southern Tenerife, Canary Islands.* PhD thesis. University of Leicester. 170 pp.

Fúster, J.M., Ibarrola, E., Snelling, N.J., Cantagrel, J.M., Huertas, M.J. ,Coello, J. and Ancochea, E. (1994). *Cronología K-Ar de la Formación Cañadas en el sector suroeste de Tenerife: implicaciones de los episodios piroclásticos en la evolución volcánica.* Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural (Sección Geológica) 89: 25-41.

Guillou, H., Carracedo, J.C., Paris, R. and Pérez Torrado, F.J. (2004). *Implications for the early shield-stage evolution of Tenerife from K/Ar ages and magnetic stratigraphy.* Earth and Planetary Science Letters 222: 599-614.

Gobierno de Canarias (2004). *Documento de aprobación definitiva del Plan Director de la Reserva Natural Especial del Barranco del Infierno (T-8).* Documento Informativo. 122 pp.

Huertas, M.J., Arnaud N.O., Ancochea, E., Cantagrel, J.M. and Fúster, J.M. (2002). *40Ar/39Ar stratigraphy of pyroclastic units from the Cañadas Volcanic Edifice (Tenerife,Canary Islands) and their bearing on the structural evolution.* Journal of Volcanology and Geothermal Research 115: 351-365.

Smyth, R.C. and Sharp, J.M. Jr. (2006). *The hydrology of tuffs.* In: Heiken, G. (ed.) Tuffs-Their properties, uses, hydrology, and resources. Geological Society of America Special Paper 408: 91-111.

ISBN: 978-84-938046-4-0

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA E HIDROGEOQUÍMICA Y MODELACIÓN DE FLUJO DEL ACUÍFERO DE LOS RODEOS (TENERIFE)

Noelia CRESPO ARRIBAS[1], Emilio CUSTODIO [2], Enric VÁZQUEZ-SUÑÉ[3]

[1] Profesional libre. C/ Virgen del Carmen, 1A, 1º9, 38170 Santa Cruz de Tenerife
cresponoelia@yahoo.es
[2] Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartografía y Geofísica, Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), C/Gran Capitán s/n, D–2, 007, 08034 Barcelona. ecustodio@upc.edu
[3] Grupo de Hidrología Subterránea, Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC) C/ Jordi Girona, 18, 08034 Barcelona, enric.vazquez@idaea.csic.es

RESUMEN

El acuífero de Los Rodeos es una porción del acuífero insular de Tenerife, en el NE, donde existen las mayores extracciones anuales de agua subterránea mediante pozos de la isla. Está constituido por formaciones basálticas recientes y subrecientes del extremo NE de la Cordillera Dorsal. Se extiende hasta el afloramiento de basaltos antiguos del Macizo de Anaga al NE. En su parte central, está atravesada por una franja con numerosos diques con igual orientación NE-SW que la dorsal. El nivel freático está a unos 300 metros de profundidad. El modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico se fundamenta en el conocimiento geológico, la información hidrométrica y la interpretación hidrogeoquímica. Se ha contado con los datos proporcionados por el Consejo Insular del Aguas y otros previos. En la zona central el agua es poco mineralizada, y sólo los pozos más profundos, que alcanzan las series volcánicas más antiguas, muestran mayor mineralización debido al efecto del volcanismo característico de la zona. Toda esta información se ha integrado en un modelo hidrogeológico numérico preliminar, basado en el modelo de funcionamiento conceptual. Se ha resuelto el flujo en estacionario en un medio con transmisividad variable y anisótropa.

Palabras clave: *Acuífero de Los Rodeos, hidrogeoquímica, anisotropía, modelo de flujo.*

ABSTRACT

The Los Rodeos aquifer is a portion of the Tenerife Island aquifer, where the highest annual groundwater abstraction is by wells of Tenerife Island. The aquifer consists of the NE end of the Dorsal Chain subrecent and recent basaltic formations and extends to the outcrop of the old basalts of the Anaga Massif in the NE. The Los Rodeos aquifer consists in a complex geological set affected by a layer strip in its central part, with numerous dykes following the same NE-SW orientation that the dorsal. The water table is located about 300 meters deep. A conceptual hydrogeological model is put forward, based on geological knowledge, hydrometric information, and hydrogeochemical interpretation. Data provided by the Island Water Council and from other previous studies have been used. In central water is slightly mineralized, and only the deepest wells, which reach the oldest volcanic series, show

greater mineralization due to the effect of the characteristic volcanism in the area. All this information is integrated into a numerical model based on the preliminary conceptual hydrogeological model, under the condition of steady flow in a heterogeneous medium with anisotropic transmissivity.

Key words: *Los Rodeos Aquifer, hydrogeochemistry, anisotropy, flow model.*

INTRODUCCIÓN

Las aguas subterráneas tienen una singular importancia en la isla de Tenerife ya que suponen más del 80% de los recursos hídricos totales actuales, incluidos los producidos industrialmente. Con el fin de comprender el funcionamiento de los acuíferos en medios volcánicos, desde la década de 1970 se vienen desarrollando estudios tanto en Tenerife como en todas las islas del archipiélago, tales como el SPA15 (1975) y el MAC21(no publicado, 1978-1980) y otros posteriores.

La hidrogeología insular se basa en el denominado modelo en capas (Navarro et al, 1989), que considera que la conductividad hidráulica de los materiales disminuye con la profundidad hasta convertirse en un núcleo de la isla o zócalo que se considera impermeable.

Aquí se pretende verificar el modelo conceptual del funcionamiento de las aguas subterráneas en el entorno amplio de Los Rodeos-La Laguna de Tenerife, con el apoyo de consideraciones hidroquímicas, de variaciones piezométricas y de modelación numérica del flujo en régimen estacionario.

CONTEXTO FÍSICO E HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA

El lugar de estudio se encuentra en el área extendida de Los Rodeos - La Laguna, localizada en el extremo de la Cordillera Dorsal NE, desde el Monte de La Esperanza hasta el Macizo de Anaga y limitada por el mar en sus extremos NW y SE (Figura 1).

Litológicamente se pueden distinguir varias series volcánicas diferenciadas entre sí bajo criterios litológicos y cronológicos (ver Figura 3): Serie I o antigua, con materiales muy alterados, que han perdido gran parte de su porosidad primaria y que afloran en el Macizo de Anaga; Serie II, moderna, caracterizada por un apilamiento de lavas y piroclastos basálticos, con un afloramiento poco extenso en la zona de estudio, pero que corresponde en profundidad con la zona saturada; y Serie III reciente, formada por coladas a-a y pahoehoe y que afloran como extensos campos de lavas desde los Montes de La Esperanza hasta La Laguna. En la zona central afloran depósitos sedimentarios formados a consecuencia del cierre por coladas de un primitivo barranco excavado sobre la Serie I (González de Vallejo, 1979).

Los diques volcánicos, que se prolongan por la Dorsal NE, son una importante estructura de la zona de estudio, que es determinante para el flujo del agua y su almacenamiento (Figura 1). Si los diques están fracturados pueden actuar como un dren y si no lo están actúan como barrera hidráulica, y en cualquier caso introducen una anisotropía horizontal en la conductividad hidráulica. La mayor densidad de diques en el eje estructural NE se sitúa en su parte central y son menos abundantes hacia la costa en cualquiera de los dos flancos, así como hacia el NE.

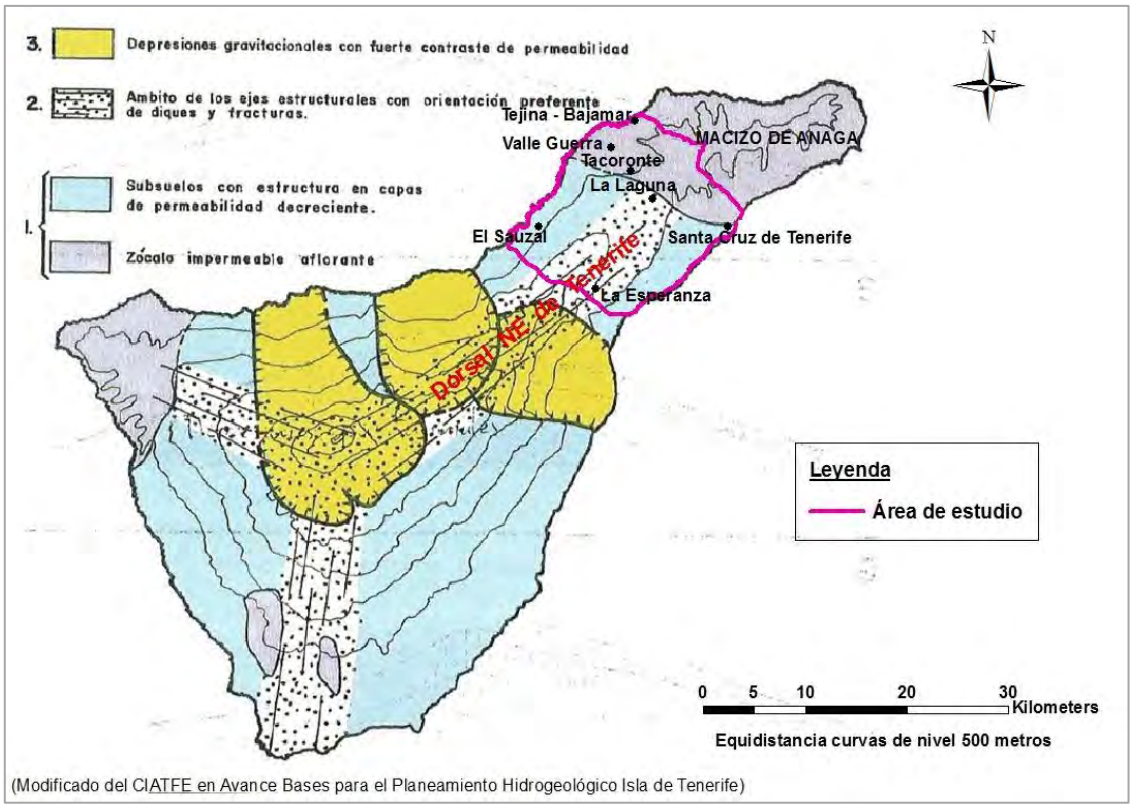


Figura 1: Situación del área de estudio en Tenerife, con la localización de las estructuras geológicas más relevantes y las localidades a las que hace referencia el texto. Modificado de CIATFE.

En esta zona de la isla coexisten diferentes usos del territorio, pero es predominante el agrícola. En el área de Valle Guerra y Bajamar (Figura 1) existen cultivos de regadío y frutales, principalmente plataneras y flores, constituyendo así el área de mayor demanda hídrica para uso agrícola. Además, a esta zona llegan las aguas del Canal del Norte cuyos aportes provienen del Canal de Aguamansa y de los pozos y galerías situados a lo largo de las medianías de la costa norte de Tenerife.

Se dispone de datos del Consejo Insular de Aguas de Tenerife (CIATFE) relativos a niveles, caudal e hidroquímica de los pozos. La Figura 2, muestra la distribución de los puntos de agua según los datos disponibles en cada uno de ellos aunque para la elaboración del modelo, referido al año 2012 se utilizaron los datos de 59 pozos.

Con los datos de nivel (desde 1987 hasta 2012) se ha comprobado lo descrito por Navarro Latorre (2008), es decir, que los pozos situados en la parte central, coincidiendo con el eje estructural (Figura 1), tienen un nivel freático más elevado que los pozos más alejados del centro del área de estudio. Por eso que tradicionalmente se considera al Acuífero de Los Rodeos como un acuífero diferenciado dentro del acuífero general de la isla. Sin embargo, aquí no se trata el Acuífero de Los Rodeos como un acuífero diferenciado dentro del acuífero general, sino como parte de un único acuífero heterogéneo.

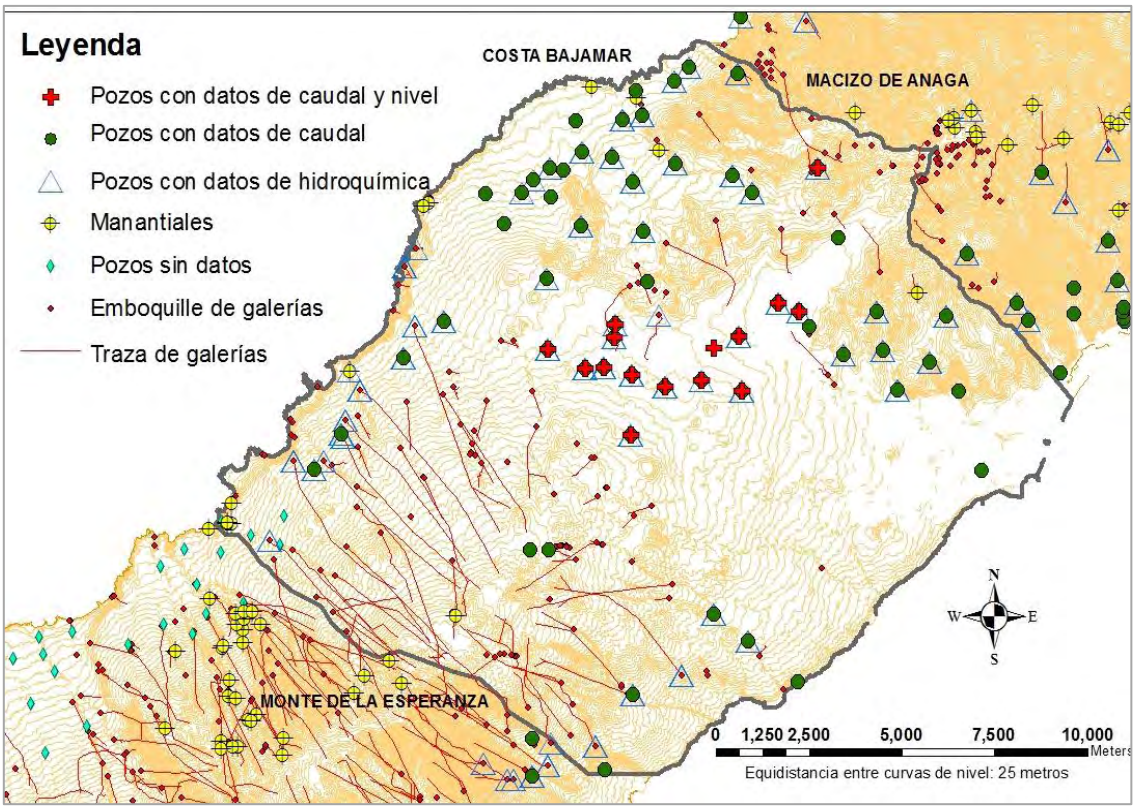


Figura 2: Área de estudio con la situación de todos los pozos, manantiales y galerías, diferenciando el tipo de datos disponibles de todos los aportados por el CIATFE.

CONSIDERACIONES HIDROGEOQUÍMICAS

Los 473 análisis químicos disponibles (recopilados desde 2002 hasta 2012), corresponden a 85 puntos entre galerías y pozos. Consisten principalmente en componentes mayoritarios y algunos minoritarios y traza, además de los valores de laboratorio de conductividad eléctrica, pH y temperatura.

El área de estudio muestra tres zonas claramente diferenciadas desde el punto de vista hidrogeoquímico (Figura 3).

Por un lado podemos distinguir que en la zona de Anaga los diagramas Stiff presentan una mayor mineralización que en el resto del área (salvo algunas excepciones de pozos claramente salinizados). Además dentro de este conjunto de pozos con aguas más mineralizadas, podemos establecer una clara diferenciación entre las muestras de la zona del Macizo de Anaga localizadas en una franja que va de costa a costa en el extremo noreste (zona de Bajamar, Valle Guerra), claramente magnésicas, del resto de las muestras de la zona de estudio que tienden a ser sódicas (zona de Santa Cruz de Tenerife).

En la zona de Bajamar y Valle Guerra, una parte de la recarga es de origen antrópico y se asocia a la infiltración de aguas de abastecimiento y de retornos de riego. Por tanto la recarga total en esta zona es tanto de origen local como traída de toda la zona Norte. El carácter agrícola se puede corroborar con los del contenido en nitratos que muestra en esta zona las mayores concentraciones (más de 25 mg/l).

En general podemos decir que en Anaga, la alta mineralización de sus aguas en una parte se debe a que el agua infiltrada, procedente de la lluvia es evapoconcentrada por

evapotranspiración, ya que se trata de zonas con amplio desarrollo de suelos y vegetación.

Otra zona diferenciable desde el punto de vista hidrogeoquímico se sitúa en la parte central, los denominados tradicionalmente pozos de Los Rodeos, que muestran una mineralización muy baja a excepción de un pozo en que se observa mayor salinidad, quizá como consecuencia de se están extrayendo aguas del acuífero de origen cada vez más profundo, con mayor efecto del aporte de CO_2 volcánico.

Por otro lado podemos localizar una serie de puntos en la vertiente Norte (zona de El Sauzal) de carácter bicarbonatado-sódico, característicos de las galerías ya que estos puntos, aunque representan el emboquille de las construcciones, sabemos que el agua proviene de algún punto situado tierra adentro en la zona de la Dorsal NE (ver Figura 2).

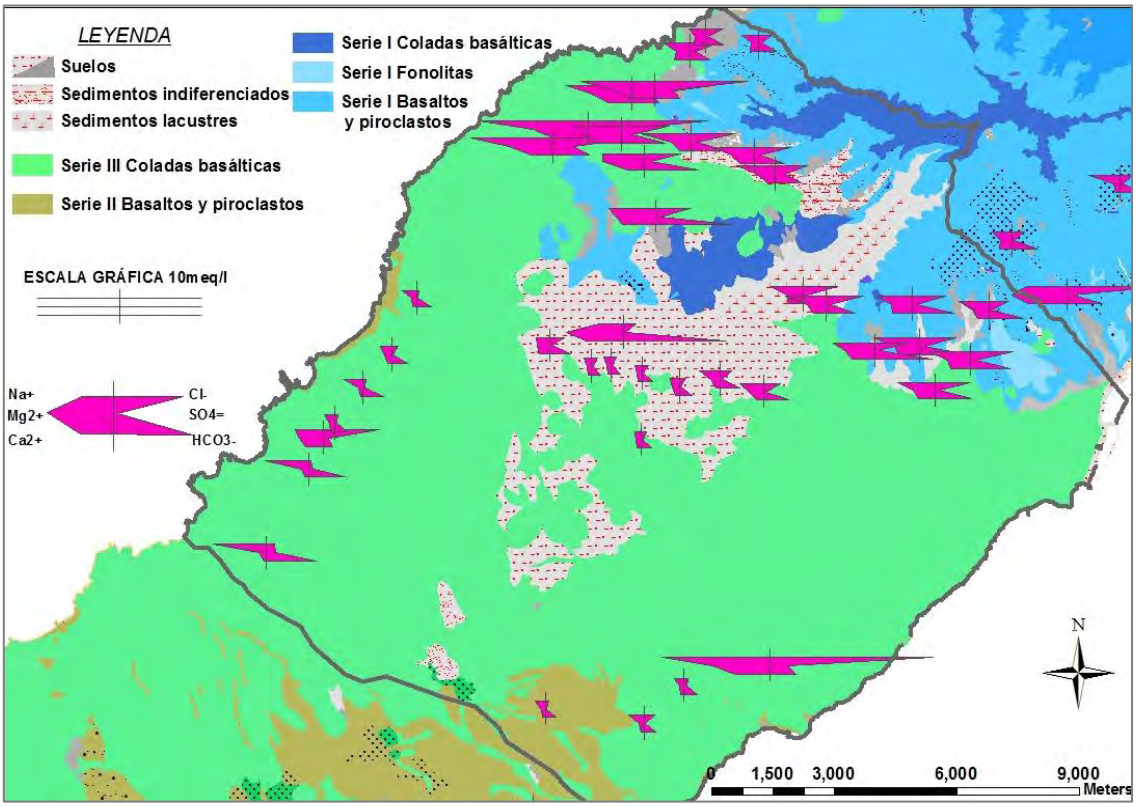


Figura 3: Mapa de distribución de diagramas de Stiff modificados, con la geología de la zona de estudio modificada de GRAFCAN (Cartográfica de Canarias).

MODELO NUMÉRICO

Con todos los datos disponibles, para simular los resultados recogidos durante la campaña de 2012 se ha elaborado un modelo numérico de flujo en régimen estacionario, utilizando el programa Visual Transin, que resuelve la ecuación general de flujo por elementos finitos (Crespo, 2014). Se considera un acuífero libre fracturado, con presencia de diques y una amplia zona no saturada que varía, según las zonas, entre varias decenas de metros y más de 450 metros y cuya transmisividad y recarga varían espacialmente.

En el modelo conceptual planteado, consideramos la entrada principal de agua al sistema es a partir de la precipitación en forma de lluvia mientras que las salidas son descargas al mar y por bombeos. No se han considerado aportes laterales ya que los límites de La Esperanza (hacia el SW, con el resto de la Dorsal) y de Anaga (hacia el NE) se han hecho

coincidir con supuestas divisorias de aguas superficiales y líneas de flujo. Esta simplificación del modelo conceptual, tiene una cierta incertidumbre, pero se ha tratado de que los límites estén lo suficientemente lejos del área de Los Rodeos como para que los errores que se derivan de una inadecuada conceptualización sean poco significativos en el área de interés.

Sabemos que la escorrentía superficial en Tenerife, y por tanto la recarga, puede ser muy diferente según la zona. Por este motivo se considera que la mejor forma preliminar de estimar la recarga es por balance de la deposición de cloruros atmosféricos. No existen datos sobre la deposición atmosférica media de cloruro en el área de LRLL pero se dispone de los datos del Acuífero de Las Cañadas (Marrero, 2010) y de los datos elaborados para el Norte de Gran Canaria, que tiene condiciones climáticas y de relieve parecidas (Hernández-Quesada et al, 2011; Cabrera et al. 2013; Naranjo et al. 2013; 2014). Así se ha adoptado que, en todas las zonas, la recarga media distribuida debido a la precipitación es de 248 mm/a.

Los ensayos hidráulicos disponibles son aforos que se localizan en la zona central del área de estudio. Los resultados de su interpretación dan valores de la transmisividad entre $10 m^2/d$ y $30{,}000 m^2/d$, por lo que resultan poco representativos. Esta alta variabilidad es normal en terrenos volcánicos (SPA-15, 1975; Custodio, 1978) ya que se trata de valores locales, con una distribución tipo Frechet muy sesgada. Dichos valores no son representativos del comportamiento del acuífero a escala regional. Para valorar el efecto de los diques asociados a la Dorsal se considera una transmisividad anisótropa horizontal, siendo los valores mayores longitudinales (según la orientación de la Dorsal) y los menores transversales (orientación de costa a costa).

Al modelo se le han aplicado las siguientes condiciones de contorno: los límites con el mar como de nivel fijo y los límites por el NE y SW, con el lado montaña, como contornos impermeables. Se han considerado 96 pozos de bombeo en los que se ha aplicado la condición de caudal prescrito. La discretización espacial consiste en una malla de 1510 nudos y 2855 elementos.

Se han introducido 59 datos de nivel piezométrico con los que se ha calibrado el modelo y se ha hecho su correspondiente análisis de sensibilidad. La calibración se ha realizado de forma manual, variando la transmisividad y la recarga para tratar de reproducir los niveles observados y anotando todos los ajustes para obtener una apreciación de la sensibilidad del modelo.

Tras la calibración se observa que los resultados de la recarga no se ajustan en todas las zonas a los rangos calculados para la deposición de cloruros, en especial en la zona central del área de estudio, donde el valor final es 80mm/año, lo que resulta un valor entre 4 y 5 veces menos que lo esperado.

La transmisividad calibrada oscila entre 25 m^2/d y 40 m^2/d para el valor longitudinal, mientras los valores de los ensayos de aforo variaban entre 7 m^2/d y 30.000 m^2/d. La diferencia se explica por ser los primeros valores regionales y los segundos dependientes de detalles locales y derivados de ensayos a veces de difícil interpretación.

Los datos de nivel son bastante fiables, pero existen factores de penetración, tipo de formación, efecto de heterogeneidades y localización que no se han tenido en cuenta y que quizá sean los que justifiquen la dificultad de obtener un ajuste aún mejor. La superficie piezométrica resultante de la calibración (Figura4) se ajusta razonablemente a la piezometría del año 2012.

A partir de los resultados del modelo calibrado se cuantifica el balance de masas, en el

que se observa que las salidas al mar son casi el doble de los caudales bombeados por los pozos (ver Figura 3). Además, se han realizado varias simulaciones para ver cómo responde el acuífero ante diversos escenarios de gestión dentro del periodo de estudio: (1) simulación que consistió en la eliminación de todas las extracciones. Se observa que los niveles se asemejaban a los obtenidos en 1925 (SURGE, 2008); y (2) simulación en la que se ha considerado una extracción doble de la actual, lo que es una situación exagerada. Con esta simulación se comprueba que la zona de Bajamar es la más afectada, tanto por el caudal bombeado como por el número de pozos que se sitúan es este lugar, con una depresión de varios cientos de metros por debajo del nivel del mar.

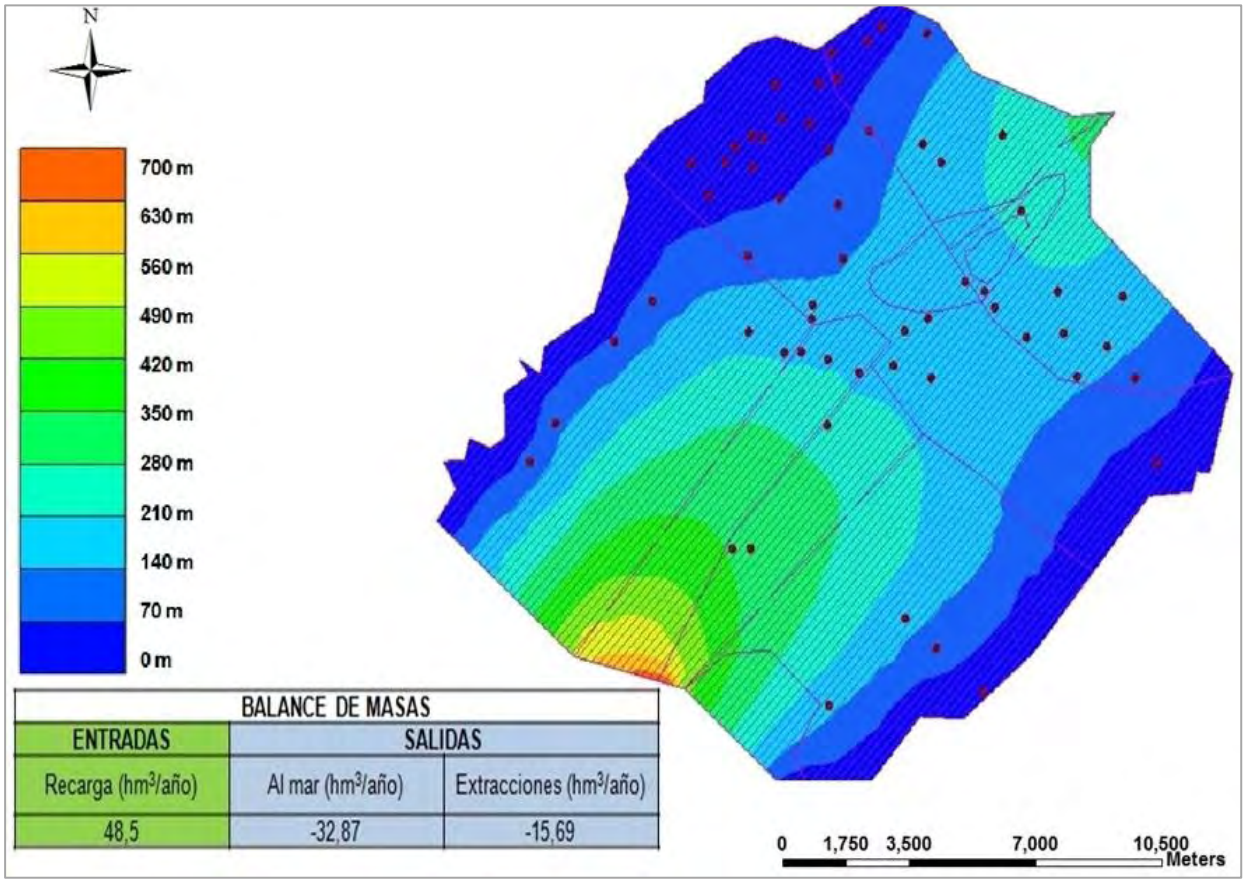


Figura 4: Superficie piezométrica resultado de la calibración en el modelo y balance de masas.

CONCLUSIONES

Existe una notable salinización relativa en los pozos de Anaga a causa de la gran evapoconcentración local y en los pozos de la zona de Valle Guerra–Bajamar (al Norte de Anaga) debido a la mezcla de agua local con retornos de riego con agua aplicada que procede principalmente de galerías y pozos de un amplio sector del norte de la isla y que en ocasiones puede estar ya bastante mineralizada.

La composición química de las aguas del área central es muy uniforme, a excepción de unos pozos en que se observa mayor salinidad, quizá como consecuencia de se están extrayendo aguas del acuífero de origen cada vez más profundo, con mayor efecto del aporte de CO_2 volcánico.

El modelo matemático es sensible a la anisotropía horizontal, con la transmisividad mayor

orientada paralelamente a los diques de la dorsal. Además, confirma y valida el modelo conceptual hidrogeológico de funcionamiento planteado. El balance de masas muestra que las salidas al mar son el doble de los caudales bombeados.

Para avanzar en el estudio integral de la zona conviene obtener datos locales sobre la deposición atmosférica de cloruros y definir las zonas de recarga mediante técnicas isotópicas ambientales, así como determinar el tiempo de renovación de las aguas subterráneas extraídas, compensando el efecto de las mezclas que se producen.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Cabildo de Tenerife, a través del Consejo Insular de Aguas, el aporte de los datos usados en este estudio.

REFERENCIAS

Cabrera, M.C.; Naranjo, G.; Hernández–Quesada, P.; Benavides, A.; Estévez, E.; Cruz–Fuentes, T.; Martín, L. F.; Custodio, E. (2013). *Estimación de la recarga natural a los acuíferos del Norte de Gran Canaria a partir del balance de cloruros.* En González, N., Kruse, E.E., Trovatto, M.M., Laurencena, P. (eds), Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Editorial Universidad de La Plata (Edulp). La Plata: 15–22.

Crespo, N. (2014). *Estudio hidrogeológico y modelización del acuífero de Los Rodeos, Tenerife*. Tesis de Máster Profesional de Hidrología Subterránea, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Barcelona.

Cruz–Fuentes, T., Cabrera, M.C., Custodio, E., Heredia, J. (2014). *Groundwater salinity and hydrochemical processes in the volcanosedimentary aquifer of La Aldea, Gran Canaria, Canary, Canary Islands, Spain.* Science of the Total Environment, 484: 154-166.

Custodio, E. (1978). *Geohidrologia de terrenos e islas volcánicas*. Centro de Estudios Hidrográficos e Instituto de Hidrología, Publicación 128, 303 pp., Madrid.

Gobierno de Canarias. Consejería de obras públicas, vivienda y aguas. Dirección General de Aguas. (1991). *Avance: bases para el planeamiento hidrogeológico. Isla de Tenerife*. Capítulo II.1.2.

González de Vallejo, L.I. (1979).*Influencia de la génesis, mineralogía y fábrica en las propiedades geotécnicas de los suelos volcánicos de La Laguna (Tenerife)*. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid.

Marrero, R. (2010).*Modelo hidrogeoquímico del Acuífero de Las Cañadas del Teide, Tenerife, Islas Canarias.* Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Barcelona.

Navarro Latorre, J.M. (2008).*Informe sobre la geohidrología del acuífero de Los Rodeos*. Consejo Insular de Agua de Tenerife (CIATFE, interno).

SPA-15. (1975). *Estudio científico de los recursos de agua en las islas Canarias. Proyecto SPA/69/515 MOP (DGOH)-PNUD (UNESCO).* Dirección General de Obras Hidráulicas-UNESCO, Madrid; 4 vols.

SURGE, Estudios Hidráulicos e Hidrogeológicos S.L. (2008).*Revisión y actualización del modelo de simulación del flujo subterráneo en la isla de Tenerife.* Consejo Insular de Aguas de Tenerife (CIATFE, interno).

ISBN: 978-84-938046-4-0

RECURSOS HÍDRICOS Y POBLAMIENTO PREHISPÁNICO EN EL ALTO TENERIFE

Constantino CRIADO HERNÁNDEZ[1], Matilde ARNAY DE LA ROSA[1], Emilio GONZÁLEZ REIMERS[1], Juan Francisco NAVARRO MEDEROS[1], Carlos GARCÍA ÁVILA[1], Efraím MARRERO SALAS[1] y Sergio POU HERNÁNDEZ[1]

[1] Departamento de Geografía e Historia, Universidad de La Laguna. 38071 La Laguna (Santa Cruz de Tenerife), España. ccriado@ull.edu.es; matarnay@ull.es; jnavarro@ull.edu.es; egonrey@ull.es; jc.garciaa@gmail.com; emarrero85@gmail.com; serpou@gmail.com

RESUMEN

El Alto Tenerife se desarrolla por encima del *Timberline,* casi siempre a cotas superiores a los 1.700 m. Aquí las precipitaciones son escasas (de 367 a 565 mm/año), y la evapotranspiración varía espacialmente entre 566 y 682 mm/año. Sin embargo, la sequedad del aire (con valor medio anual de 48%), el viento NO y la radiación (80% de la teórica) dan una aridez real mayor. A este clima se le añade una elevada permeabilidad de la mayor parte de las formaciones geológicas (70% tiene menos de 40 ky, con piroclastos y lavas recientes). La escorrentía es esporádica y afecta sólo a los sustratos más antiguos. Algunas cuencas endorreicas limosas permiten la acumulación de agua, especialmente en invierno. La pared y el dorso de la Caldera presentan nacientes (unos 20), de caudal limitado y asociados a acuíferos locales. Sin embargo, los arqueólogos constatan la existencia de numerosos restos de ocupación humana, tanto prehispánicos como históricos (405 cabañas y 81 cuevas y abrigos). En esta contribución planteamos las posibles estrategias de aprovechamiento del agua desarrolladas por las poblaciones prehispánicas (Guanches) e históricas que, estacional o permanentemente, vivieron en el Alto Tenerife.

Palabras clave: *Recursos hídricos, Alto Tenerife, Guanches, Teide, Islas Canarias.*

ABSTRACT

High Tenerife develops usually above 1,700 m altitude. Rainfall is low (from 367-565 mm. year^{-1}) and the evapotranspiration varies spatially between 566 and 682 mm.year^{-1}. However, dry air (with annual average of 48%), NW wind and radiation (80% of theory) give a higher real aridity. In this climate there is added a high permeability of most geological formations (90% have less than 32 ky, with recent lavas and pyroclastic deposits). Runoff is sporadic and only affects older substrates. Some silty endorheic basins allow the accumulation of water, especially in winter. The springs (about 20) appear only in the wall and slopes outer of the Caldera and they are associated with limited flow from local aquifers. However, archaeologists confirm the existence of numerous remains of human occupation, both as historical prehispanic (405 huts and 81 caves and shelters). In this contribution we propose possible strategies of water management developed by the prehispanic people (Guanches) and historic populations, seasonal or permanently, lived in Upper Tenerife.

Key words: *Water resources, High Tenerife, Guanches, Teide, Canary Islands.*

INTRODUCCIÓN

En la presente comunicación hacemos una valoración de las condiciones climáticas e hidrogeológicas existentes en el alto Tenerife, por encima del límite del *timberland,* en relación con las evidencias de poblamiento prehispánico e histórico (Figura 1). Hemos considerado este límite en la medida en que las regiones por encima del bosque constituyen un dominio climático (clima de alta montaña) y biogeográfico (zona del retamar-codesar). Desde un punto de vista arqueológico las zonas supraforestales presentan una notable riqueza en yacimientos, diferenciándose áreas de hábitat al aire libre (cabañas), áreas de actividad, hábitat en cuevas y yacimientos funerarios. Las dataciones de ^{14}C realizadas sobre huesos humanos se remontan a fechas tan antiguas como el siglo IV AD, habiéndose documentado radiométricamente la pervivencia del modo de vida prehispánico hasta, por lo menos, el siglo XVII AD. La pregunta es: ¿cómo y en donde obtenían el agua estas poblaciones?

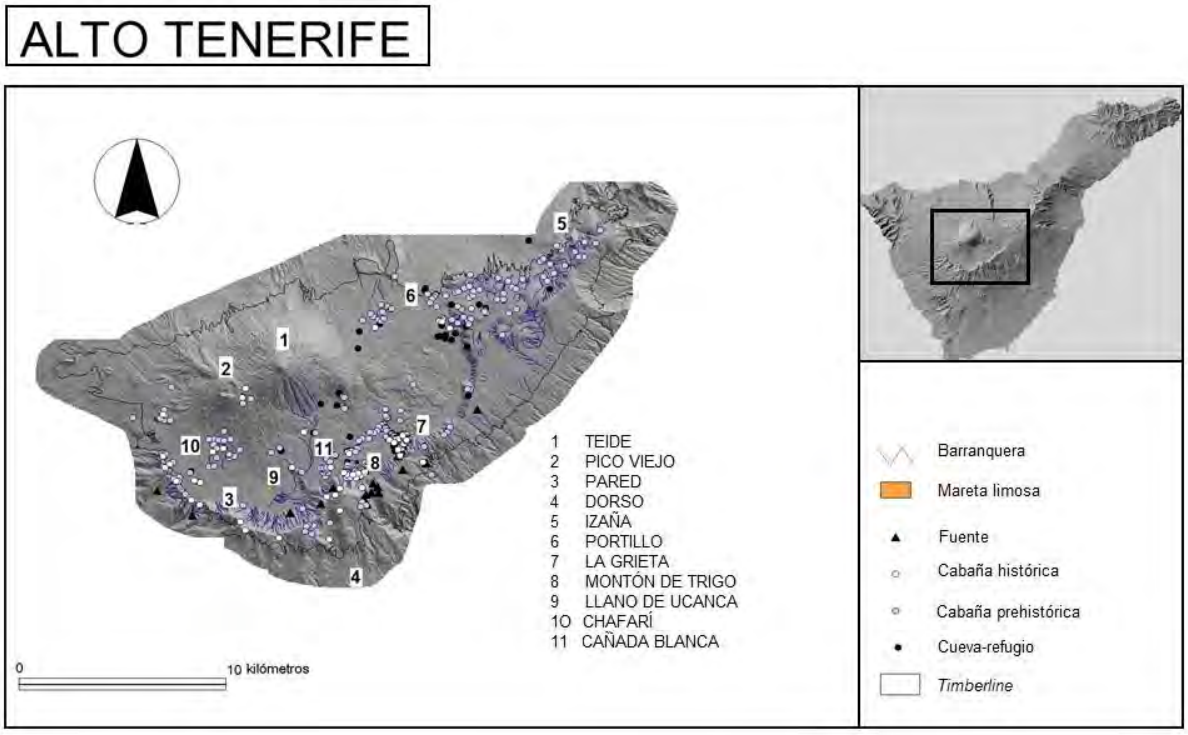


Figura 1. Disposición de los hábitats guanches e históricos en el Alto Tenerife.

MARCO GEOGRÁFICO

El territorio que hemos considerado ocupa la parte más elevada de la isla de Tenerife, por encima del límite superior del bosque. Se trata de un sector, por encima siempre de los 1.700 m de altitud, si bien, en algunos puntos y por razones geológicas y topográficas desciende hasta los 1.200 m. Su superficie es de 21.563,6 Has.

Los condicionantes geológicos

Desde un punto de vista geológico se reconocen dos unidades bien diferenciadas. El dorso y pared de Las Cañadas y las zonas de volcanismo del Pleistoceno Tardío y Holoceno.

La primera conforma el borde de la depresión de Las Cañadas, presentando una topografía contrastada entre los sectores del dorso (con pendientes de hasta 30º excepto en las cabeceras de los barrancos que drenan hacia la vertiente de sotavento de la isla donde alcanzan los 50º e incluso abruptos de 70º) y la pared de las Cañadas con un sector superior de pendientes muy fuertes (50º a 70º) y las laderas con valores de entre 30º-40º en las acumulaciones de derrubios de ladera e inferiores donde se abren los aluvial fans (10º a 20º). Si exceptuamos las acumulaciones detríticas (Pleistoceno Superior y Holoceno), el resto de los afloramientos corresponden a rocas volcánicas, que van desde basaltos a traquitas y fonolitas (IGME, 1984 a y b). Estaríamos ante los restos de los primitivos edificios Pleistocenos que conformaron las cumbres de Tenerife (Martí y Gudmunsson, 2000).

La segunda unidad está constituida por todas las formas volcánicas que ocupan el interior de la caldera y que presentan una antigüedad inferior a los 40 ky (Carracedo et al., 2007). Destacan los estratovolcanes del Teide (3.718 m) y Pico Viejo (3.100 m) numerosos conos de cínder, domos sálicos, coladas (*pahoehoe*, *aa,* en bloques) y acumulaciones piroclásticas (*lapilli* o pómez). Toda la zona ha sido muy activa a lo largo del Holoceno con manifestaciones prehistóricas e incluso históricas (Siete Fuentes y Fasnia 1704 -1705 y Narices del Teide 1798).

Los factores climáticos

Aún no disponemos de información respecto al clima que soportaron los Guanches en el Alto Tenerife. Sólo podemos apuntar a la posible existencia de un clima algo más húmedo que el actual en momentos anteriores al siglo XIII AD; ello lo deducimos de la presencia de restos de carbón vegetal en los hogares del yacimiento de Chafarí (Machado y Galván, 1998), en los que aparecen fragmentos de especies arbóreas como el *Pinus canariensis* y el *Juniperus cedrus.* Dichas especies podrían haber desaparecido del interior de la caldera como consecuencia de un incremento de la aridez a finales del Periodo Cálido Medieval, sin obviar el factor de selección humana del combustible empleado.

A la espera de poder conocer el paleoclima del Holoceno Superior a través de *Proxy Data*, podemos inferir que el ambiente climático soportado por los Guanches en el Alto Tenerife no debió ser muy diferente al actual.

El alto Tenerife se sitúa, en su casi totalidad, por encima del nivel de inversión de los alisios, lo que determina que prácticamente todo el año su atmosfera presente un valor de humedad relativa inferior al de las zonas más bajas (48% frente a 73% en medianías y de 63% a 67% en costas, según datos de la AEMET;Bustos y Delgado, 2000). La distribución mensual muestra variaciones estacionales (diciembre 59% y julio 29%).

Aparte de los datos de temperaturas de Izaña contamos también con series más cortas de estaciones del interior del Parque Nacional (Tabla I). Las medias anuales oscilan entre los 9,7º C de Izaña y los 12,6º C de Samara. Las máximas absolutas van de los 30,4º C en Izaña y 35,0º C en Samara y las mínimas absolutas van de -6,3º C en Samara a -9,5 en Base del Teide (la estación del Pico a 3.530 m da una mínima absoluta de -16,8º C).

Las precipitaciones muestran valores medios anuales que rara vez superan los 500 mm (Tabla I). Existe una acusada sequía estival de abril a septiembre, cayendo un tercio de la lluvia anual el mes de diciembre. Da la sensación de que los bordes del Parque Nacional, más expuestos a los vientos del oeste, suroeste y norte – los que traen las precipitaciones- registran totales medios anuales ligeramente más elevados que las estaciones más al interior que no alcanzan los 400 mm/año (Portillo, Parador y Base del Teide). La nieve es una de las características del Alto Tenerife (Izaña registra 12,6 días de nieve al año). Hay

que destacar la variabilidad interanual de las precipitaciones. La serie de Izaña muestra periodos por encima del valor medio y otros muy por debajo (1399 mm en 1953 y 105,2 mm en 1994), con tendencia decreciente. El coeficiente de variación (CV) es 51,97%.

Tabla I. Variables climáticas de estaciones del Alto Tenerife.

Estación	Pmm	Pmm Abril-octubre	Idem %	Temp. Media anual	Máxima absoluta	Mínima absoluta	ETP	HR%
Samara	495,8	19,9	4%	12,6	35	-6,8	679	
BocaTauce	428,0	16,2	3,8%	11,8	32,1	-7,3	564	
Parador	360,4	11,5	3,1%	11,4	32,8	-9,5	567	
Portillo	367,5	37,2	10,1%	10,7	31,5	-5,7	617	
Base Teide	355,8	23,3	6,5%	12,9	34,1	-9,1	682	
Izaña	501,0	102	20,3%	9,7	30,4	-7,2	600	48%

La evapotranspiración (ETP) calculada según Thornthwaite y su comparación con las precipitaciones medias mensuales (Pmm), evidencia déficits hídricos (Tabla I), aunque inferiores a los reales al no reflejarse en los mismos el papel del viento (del NW el 50,1% con velocidad media anual de 8,1 m/seg y racha máxima de 53,2 m/seg), la débil humedad atmosférica y la fuerte insolación (3.448,5 horas/año).

HIDROLOGÍA SUPERFICIAL E HIDROGEOLOGÍA

El carácter volcánico reciente del 70% del Alto Tenerife y las escasas precipitaciones, explican la mediocridad de los procesos hidrológicos superficiales. El mayor número de cauces se asocia a pequeñas cuencas de recepción de la pared de las Cañadas. De corto recorrido salvan desniveles de más de 500 m en las Cañadas Occidentales. En el dorso los cauces son exorreicos y algunos de ellos de carácter permanente (Barranco del Rio). El resto son endorreicos, de corto recorrido (excepto La Corbata - Cañada Blanca de casi 6 km), simples, con una jerarquía máxima de tercer orden y actividad sólo tras lluvias intensas. Se sustrae a esta norma el arroyo del Riachuelo, con caudal todo el año. Algunos cursos, especialmente en sus sectores más bajos, discurren entre un lecho de aluviones que facilita la infiltración.

Las cuencas endorreicas en sus sectores más deprimidos, están rellenas de material muy fino (con porcentajes de fracción < 50 μm que van desde un 82,8 % a un 99,1%), que le otorga una elevada impermeabilidad. Las medidas de infiltración realizadas en ellas dieron valores inferiores a ½ litro/hora, lo que permite la formación de maretas naturales por acumulación de aguas de lluvia o provenientes de la fusión de la nieve.

Desde un punto de vista hidrogeológico el informe realizado por el IGME (1982) reconoce 5 formaciones diferentes:

- **Formación A.** Basaltos fisurales correspondientes a las primeras fases de las Formaciones *Ucanca*, *Guajara* y *Diego Hernández* (Martí y Gudmunsson, 2000). En general son coladas basálticas de tipo escoriáceo, pequeña potencia, algo meteorizadas y rellenas de minerales secundarios. Constituyen un conjunto de permeabilidad media.

- **Formación B.** Pitones y series traquíticas y traquibasálticas de Fúster et al. (1968). Desde el punto de vista hidrogeológico se caracterizan por su permeabilidad pequeña, debido principalmente a la fisuración y diaclasado secundario de pitones y coladas.

- **Formación C.** Niveles de tobas pumíticas que, en ocasiones presentan marcada estratificación y se encuentran intercaladas en la Formación B ya descrita. Se considera que su permeabilidad es prácticamente nula, propiciando, junto con los paleosuelos, niveles por los que el agua infiltrada pudiera discurrir o quedar retenida.

- **Formación D.** Materiales volcánicos recientes e incluso históricos que se encuentran fosilizando el relieve de la antigua caldera (Serie III y IV de Fúster et al., 1968). Se caracteriza por tener una permeabilidad elevada.

- **Formación E** (Formación sedimentaria). Está constituida por depósitos de tipo detrítico que han rellenado parcialmente las cuencas endorreicas, depósitos de ladera y depósitos aluviales. Dado el carácter de grano fino de los sedimentos de las áreas endorreicas y marcadamente heterométrico, con materiales arcillosos, de los derrubios de ladera, su permeabilidad se estima como media.

Las tres primeras formaciones, de permeabilidad media o nula, ocupan una superficie próxima a las 5.410 Has, lo que supone un 25% de la superficie del parque, siendo la formación E la menos representada con aproximadamente un 5% de la superficie total. Los materiales pertenecientes a la formación D (< 40 ka) ocupan alrededor del 70% del territorio. Esto supone que la escorrentía básicamente aparece sobre los materiales de las formaciones A, B. C y E, estando ausente en casi toda la formación D. Esta se comporta como una esponja, infiltrando buena parte de la lluvia y del agua de la fusión de nieve; sólo hay evidencias geomorfológicas de escorrentía en algunos sectores como la ladera de Pico Viejo (Valle de Chafarí, por ejemplo), corredores de las caras sur y este del Teide y volcanes del Pleistoceno Final de la zona del Portillo-Izaña.

La alta capacidad de infiltración da lugar a la existencia del acuífero de Las Cañadas, a unos 80 m bajo el Llano de Ucanca (IGME, 1982). Este acuífero está bien monitorizado (Farrujia et al, 2004) y estudiado desde un punto de vista geoquímico (Marrero, 2010), pero sus aguas no pudieron ser aprovechadas por las poblaciones guanches que habitaron el Alto Tenerife. En cambio sí lo fueron los manantiales que se localizan en la pared de Las Cañadas y en las cabeceras de los barrancos que muerden su dorso (González-Mancebo et al., 1991; IGME, 1982). Normalmente los nacientes se producen en el contacto entre coladas traquíticas y fonolíticas, con una fracturación variable, que reposan sobre niveles pumíticos impermeables; algunas de estas fuentes han sido mejoradas por la mano del hombre. Los estudios muestran un agua con escasa conductividad, oscilando entre 70 y 230 µS/cm (IGME, 1982).

LA OCUPACIÓN HUMANA PREHISPÁNICA

Los estudios arqueológicos han inventariado abundantes restos de la cultura Guanche. Estas evidencias permiten trazar, a grandes rasgos, la forma de vida del hombre guanche en un ambiente hostil como el del Alto Tenerife. Las dataciones de ^{14}C (sobre restos humanos) retrotraen la presencia de los guanches en Las Cañadas al menos hasta el siglo IV AD, perviviendo sus manifestaciones culturales en este territorio hasta entrado el siglo XVII, es decir en momentos posteriores a la Conquista de Tenerife (1496 AD).

En relación con el hábitat, las cuevas están condicionadas por la geología y en el caso

del Alto Tenerife no son especialmente abundantes. En ocasiones llama la atención la lejanía a cualquier punto de agua (3,4 km). El hábitat en cabañas es más expresivo, ya que las mismas, construidas con piedra seca y a menudo adosadas a afloramientos rocosos, se levantaban en función de las necesidades de sus constructores.

Se reconocen varios sectores con un elevado número de cabañas. Al noreste, se han contabilizado 60 cabañas entre el Portillo y Montaña de La Negrita, con un único punto de agua localizado (Fuente de Las Vacas). En torno al Roque del Peral aparece un grupo de 15 a 1 km de los sedimentos groseros que conforman la Cañada de Los Guancheros. Otras 4 se ubican en las laderas de Montaña Blanca alejadas de cualquier punto de aguada. En torno a la Cañada de La Grieta se localizan 36, instaladas sobre las coladas holocenas de Montaña Blanca y Montaña de La Cruz y a distancia a las fuentes que oscilan desde los 300 a los 1.500 m. Al norte de la Cañada del Montón de Trigo, sobre las lavas de Montaña de La Cruz, se reconocen 33 restos de cabañas, muy diseminadas y a distancias de entre 70 y 700 m respecto a la mareta y de entre 700 y 1.380 m a la fuente. En este mismo malpaís, pero en su borde oeste, próximo al Parador, se localizan otras 15 muy diseminadas no existiendo ningún posible punto de agua. En la ladera de Pico Viejo, en los alrededores del Valle de Chafarí, se han inventariado 21 cabañas; aquí la llegada de cursos de agua estacionales a terrenos con relleno sedimentario grosero pudo haber facilitado la obtención de agua por medio de *eres*.

En algunas zonas (Cañada de La Grieta, Cañada Blanca) llama la atención la relativa lejanía de las áreas de mayor densidad de cabañas prehistóricas y los manantiales (Figura 2). Este patrón se modifica si atendemos a la distribución de las cabañas históricas que situaron su hábitat lo más cerca posible del aprovisionamiento de agua, en zonas llanas y cerca del camino. Los guanches buscaron lugares más elevados, con mayor control y dominio visual de las áreas circundantes ¿Qué razones explican el comportamiento de los pobladores guanches respecto a los históricos? ¿Sería más inseguro el mundo prehispánico de lo que hasta ahora hemos pensado? De ser así, ello explicaría la elección del *malpaís*, con mejor visibilidad y más difícil acceso, que la comodidad de los llanos próximos a las fuentes.

Lo que parece incuestionable es que los guanches tuvieron que enfrentarse a un medio difícil, con mayores rigores térmicos y un déficit hídrico superior al de zonas más bajas, más ricas en agua, temperaturas moderadas y humedad relativa más elevada. Estudios sobre la paleodieta de los guanches basada en el análisis químico de sus restos óseos (Arnay et al., 2010 y 2011) permite plantear nuevas hipótesis. Así, los contenidos en N (en %) de las muestras óseas procedentes del Bco. de Agua de Dios (Tegueste) mostraban valores inferiores a 12% en 14 individuos, frente a sólo 3 individuos con más del 12%. Para los restos excavados en Las Cañadas la proporción varía de forma que de 14 individuos, sólo 6 mostraban valores de % N por debajo del 12% y 8 lo superaban, alcanzado dos de ellos valores por encima del 15%. Estos incrementos en el contenido en N de los restos óseos pueden vincularse a una mayor ingesta proteínica, aunque también pueden derivar del *stress hídrico* (Arnay et al, 2011). Los bajos valores del ΔD podrían apoyar esta segunda posibilidad. Muestras óseas procedentes de Las Cañadas dieron valores de entre 4 y -18, dando algunos restos óseos (con fechas de ^{14}C posteriores a la Conquista) los valores más significativos.

Las fuentes históricas, la Bioantropología y el ^{14}C confirman la presencia de guanches viviendo en el Alto Tenerife, en fechas posteriores a la Conquista Castellana. Los llamados *Alzados,* a diferencia de sus antepasados, pasarían todo el año en las cumbres de la isla, soportando los rigores del invierno y escasez de agua del verano. ¿Explicaría esto las posibles evidencias de *stress* hídrico en los restos de los *Alzados* del Alto Tenerife?

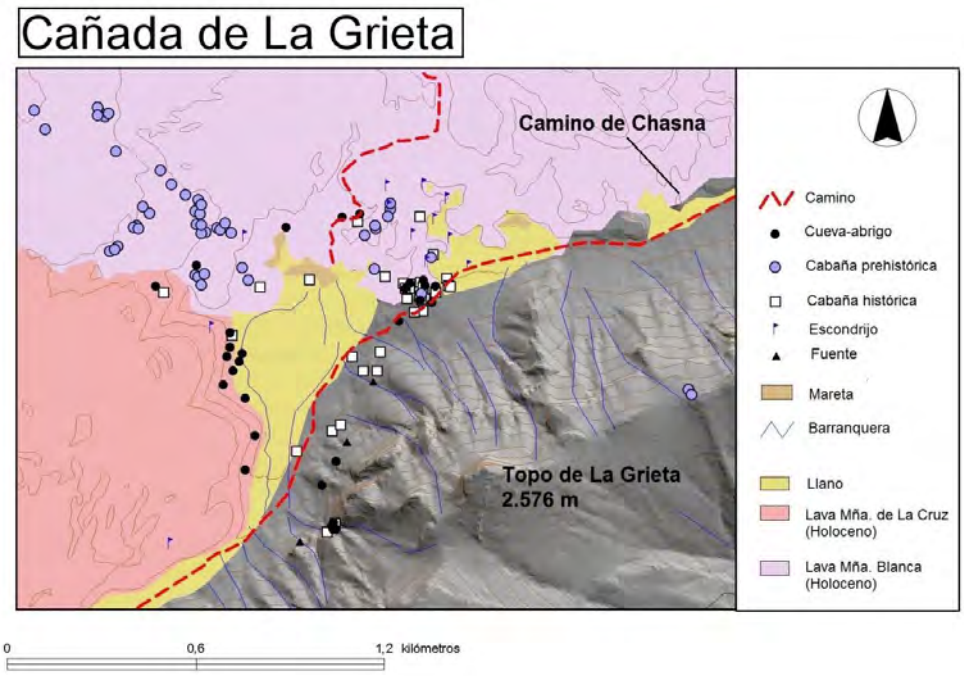


Figura 2. Disposición del hábitat guanche e histórico en relación con las lavas holocenas, fuentes, maretas y barranqueras en La Cañada de La Grieta.

CONCLUSIONES

La Arqueología ha probado la presencia guanche desde el siglo IV AD. Tradicionalmente su presencia en las cumbres se asocia a la actividad pastoril en primavera y verano (debido al valor nutricional de las leguminosas de montaña), pero es posible que la búsqueda de materias primas líticas (fundamentalmente obsidiana), junto con reuniones intertribales y motivos religiosos haya justificado su presencia en estos paisajes ásperos, con clima duro y escasez de agua.

Quizás la escasez de agua que observamos hoy no fue tal en el pasado. La existencia de especies arbóreas en el yacimiento de Chafarí podría indicar condiciones más húmedas que las actuales al menos hasta el siglo XIII AD. Lo que parece claro es que la principal fuente de agua fueron siempre los manantiales asociados a los acuíferos locales sitos en la pared y dorso de Las Cañadas; la acumulación de agua en las maretas de fondo limoso es un hecho constatado, pero ésta, asociada a la fusión de nieves o las lluvias intensas, sólo permite el uso del agua almacenada en los meses de invierno, cuando las necesidades de aguas son menores y cuando, con toda probabilidad, las poblaciones prehistóricas pre-Conquista no subían al Alto Tenerife. Lo mismo ocurriría con la excavación de sedimentos tras las lluvias. Éstas podrían ser practicables pero siempre en los días posteriores a las lluvias, por lo que a menos que haya cambiado drásticamente el régimen pluviométrico, sólo se obtendría agua durante algunos días de invierno.

Los estudios desarrollados sobre restos humanos parecen alumbrar en lo que se refiere al *stress hídrico* sufrido por los guanches, tanto los anteriores al siglo XVI AD como *Los Alzados.* En este sentido resultaría de interés poder datar por ^{14}C todos los individuos encontrados en las Cañadas y ver si realmente hay una relación clara entre los valores del marcador ΔD y la fecha en la que vivieron los individuos, o lo que viene a ser lo mismo si podían bajar libremente a zonas de medianía y costa más ricas en agua o por el contrario debían permanecer todo el año en las cumbres de la isla.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo forma parte del proyecto de investigación: "*Estudios sobre el Patrimonio Arqueológico del Parque Nacional del Teide"*, financiado por el OAPN, referencia 328/2011. Agradecemos al personal del Parque Nacional del Teide las facilidades dadas para la realización del presente trabajo. Las sugerencias y comentarios de los revisores de la presente contribución han mejorado la calidad final de la misma.

REFERENCIAS

AEMET. *http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valoresclimatologicos?l=C430E&k=coo*

Arnay de La Rosa, M.; González Reimers, E.; Yanes, Y.; Velasco, J.; Romanek, C.S.y Noakes, J.E. (2010). *Paleodietary analysis of the prehistoric population of the Canary Islands inferred from stable isotopes (carbon, nitrogen and hydrogen) in bone collagene.* Journal of Archaeological Science 37: 1490-1501.

Arnay de La Rosa,M.; González Reimers, E.; Yanes, Y.; Romanek, C.S.; Noakes, J.E. y Galindo Martín, L. (2011). *Paleonutritional and paleodietary survey on prehistórical humans from Las Cañadas del Teide (Tenerife, Canary Islands) based on chemical and histological analysis of bone.* Journal of Archaeological Science 38: 884-895.

Bustos, J.J y Delgado, F. (2000). *Climatología del Parque Nacional de Las Cañadas del Teide.* En *http://www.iac.es/proyect/sitesting/TOPSITES/principal.html*

Carracedo, J.C., Rodríguez- Badiola, R., Guillou, H., Paterne, M., Scaillet, S and F.J. Pérez-Torrado (2007). *Eruptive and structural history of Teide Volcano and rift zones of Tenerife, Canary Islands* Geological Society of America Bulletin 119 (9-10):1027-1051.

Farrujia, I.; Velasco, J.L.; Fernández, J. y Martín, M.C. (2004) *Evolución del nivel freático en la mitad oriental del acuífero de Las Cañadas del Teide. Cuantificación de parámetros hidrogeológicos.* Asociación Española de Hidrogeología, Tomo XXVI: 131-142.

Fúster, J.; Araña, V.; Brandle, J.; Alonso, U. y Aparicio, A. (1968). *Geology and Volcanology of the Canary Islands. Tenerife.* Instituto Lucas Mallada, CSIC. 218 pp.

González-Mancebo, J.M.; Beltrán, E. y Losada, A. (1991): *Contribución al estudio de la flora y vegetación briofítica higro-hidrófila de Las Cañadas del Teide (Tenerife).* La Laguna .IEC. 131

IGME (1982). *Estudio hidrogeológico del Parque Nacional de las Cañadas del Teide*. Informe inédito.

IGME (1984a): *Mapa Geológico de España a escala 1:25.000: Hoja 1110-I Las Cañadas del Teide*. Madrid.

IGME (1984b): *Mapa Geológico de España a escala 1:25.000: Hoja 1110-II Llano de Ucanca*. Madrid.

Machado, M.C. y Galván, B. (1998). *La vegetación en el valle de Chafarís (Las Cañadas del Teide, Tenerife) antes de la Conquista Castellana.* Cuaternario y Geomorfología 12 (1-2): 117-125.

Marrero, R. (2010). *Modelo hidrogeoquímico del acuífero de Las Cañadas del Teide, Tenerife, Islas Canarias.* Tesis doctoral inédita. Universitàt Politécnica de Catalunya. 425 pp.

Martí, J. y Gudmunsson, A. (2000). *The Las Cañadas Caldera (Tenerife, Canary Islands): an overlapping collapse calderas generated by magma chamber migration*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 103: 161-173.

ISBN: 978-84-938046-4-0

CALIDAD DE LAS AGUAS SUPERFICIALES AFECTADAS POR UN INCENDIO FORESTAL (LA GOMERA 2012)

Francisco J. DÍAZ[1], Marisa TEJEDOR[1], Concepción JIMÉNEZ[1], José M. HERNÁNDEZ-MORENO[1]

[1] Departamento de Biología Animal, Edafología y Geología, Universidad de La Laguna. Avenida Astrofísico F.Sánchez, s/n. 38204 La Laguna. fjdipe@gmail.com; martesa@ull.edu.es; cacojime@ull.edu.es; jhmoreno@ull.edu.es

RESUMEN

En este trabajo se presentan los primeros resultados obtenidos sobre el efecto del incendio de La Gomera 2012 en la evolución de la calidad de las aguas superficiales generadas. Se estudiaron las aguas de escorrentía tomadas en el cauce principal de la red de drenaje de cuencas afectadas (Q) y no afectadas (NQ) por el fuego, así como las aguas de presas con áreas de captación en dichas cuencas. Se estudiaron algunas propiedades de los suelos afectados por el incendio antes del comienzo de la estación de lluvias. Se estudiaron los parámetros de los suelos relacionados con la producción de sedimentos (SS), y con los componentes solubles. Como era de esperar, las aguas Q presentaron los mayores valores de SS que las aguas NQ, decreciendo con el tiempo y sin que se mostrara una relación clara con los picos de intensidad de lluvia y la estacionalidad. Los sólidos totales disueltos (CE) descendieron progresivamente. Contrariamente a lo observado en otros estudios, no hubo diferencias significativas de la CE entre las aguas Q y NQ. Asimismo, estos datos tampoco fueron consistentes con los valores de salinidad de los suelos antes de que se produjeran lluvias significativas. Se discuten los posibles mecanismos implicados en el transporte de material soluble y particulado.

Palabras clave: *Incendios forestales, Andosoles, escorrentía, calidad de aguas.*

ABSTRACT

The evolution of the surface water qualities generated after the 2012 wildfire occurred in the island of La Gomera was studied. To this aim, runoff waters from burned (Q) and unburned watersheds (NQ) were analyzed, along with those from the dams downstream these watersheds. Some of the properties related to sediment (SS) and soluble salts production were also studied in soils sampled after the fire and before the rainy season. As expected, Q waters showed the greatest SS values which decreased with time without a clear relation with the rain intensity. Total dissolved solids (EC) decreased gradually with time. No significant EC differences were observed between Q and NQ waters, as suggested by other studies. Also, these EC data were not consistent with the surface salinity values of the soils just after the fire. The likely mechanisms involved in the transport of soluble and particulate matter were discussed.

Key words: *forest wildfires, runoff, Andosols, water quality.*

INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales tienen un gran impacto en los procesos que actúan en los ecosistemas (Johnson and Miyanishi, 2001) y tienen un efecto negativo en la calidad del agua al alterar la hidrología de las cuencas, aumentando la producción y transporte de sedimentos y nutrientes a las corrientes de agua (DeBano et al., 1979). Los estudios a escala de vertiente suministran una visión integrada de los efectos del fuego en los ecosistemas. En Canarias no nos consta la existencia de trabajos de investigación sobre la influencia de los incendios forestales en la calidad de las aguas superficiales. En este trabajo se presentan los primeros resultados obtenidos sobre los efectos del fuego en la evolución de la calidad de las aguas superficiales generadas por los sucesivos eventos pluviométricos que tuvieron lugar después del incendio de 2012 en la isla de La Gomera. Esta isla ha sufrido un total de 95 incendios entre 2002-2012, siendo el de agosto de 2012 el más importante, afectando a 2714 ha de superficie forestal y cuya extinción fue muy compleja debido a un progreso subsuperficial del incendio. De cara a los objetivos planteados, se han seguido dos aproximaciones: i) estudio de las aguas de escorrentía tomadas en el cauce principal de la red de drenaje de cuencas afectadas (Q) y no afectadas (NQ) por el fuego; ii) estudio de las aguas de escorrentía de presas con áreas de captación Q y NQ.

MATERIAL Y MÉTODOS

El estudio se ha llevado a cabo en la isla de La Gomera, en el área afectada por el incendio ocurrido en Agosto de 2012 (~ 3600 hectáreas) y áreas limítrofes no afectadas. Parte del área afectada por el incendio se encuentra dentro del Parque Nacional (P.N.) de Garajonay (Figura 1) y sustenta una vegetación típica de Monteverde (*Persea indica, Laurus novocanariensis, Ilex canariensis, Erica arborea, Morella faya*).

Los efectos del fuego en las propiedades de los suelos fueron determinados a partir de un muestreo realizado dos meses después del incendio y con anterioridad al comienzo de la época de lluvias, dentro del P.N.: 6 parcelas de 100 m^2 afectadas por el fuego y 6 parcelas no afectadas, horizontes A_o y A_1. En superficie predominan Andosoles aluándicos superpuestos generalmente sobre Ferralsoles. En 120 muestras se determinaron los siguientes parámetros: conductividad eléctrica (CE) y pH en el extracto 1:2.5, y materia orgánica total por combustión (Soil Survey Staff, 1996). En el caso de las aguas de escorrentía se eligieron 5 cuencas dentro del P.N., tres afectadas por el fuego (denominadas 1, 2 y 3) y dos no afectadas (denominadas 4 y 5) (Figura 1).

Alrededor de los puntos centrales de estas cuencas se tomaron 3 muestras de agua tras cada uno de los eventos de lluvia que generó escorrentía. Se tomaron muestras en 6 eventos de escorrentía denominados del 1 al 6 y que correspondieron a 77, 103, 201, 470, 474 y 483 días después de la finalización del incendio, respectivamente. Estos eventos estuvieron asociados a lluvias en 24 horas de 62.2, 22.2, 33.4, 20.2, 41.6 y 38.6 mm, respectivamente. Para la segunda aproximación se seleccionaron 25 presas, 4 de ellas situadas, así como la totalidad de sus áreas de captación, dentro del perímetro del incendio. En estas presas se tomaron muestras de agua a una profundidad de 1 m en la columna de agua a los 100, 108, 252 y 623 días después de la finalización del incendio. Los parámetros analizados en las muestras filtradas por 0.20 µm fueron: CE, pH, cationes (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, NH_4^{+}), aniones (HCO_3^{-}, Cl^{-}, SO_4^{2-}, PO_4^{3-}(P reactivo), NO_3^{-}, NO_2^{-}, Br^{-}) y carbono orgánico disuelto. En muestras no filtradas se determinó: sólidos totales en suspensión (TSS), la demanda química de oxígeno (DQO), fósforo total, nitrógeno total, y turbidez. Se siguieron los métodos de la American Public Health Association (1992).

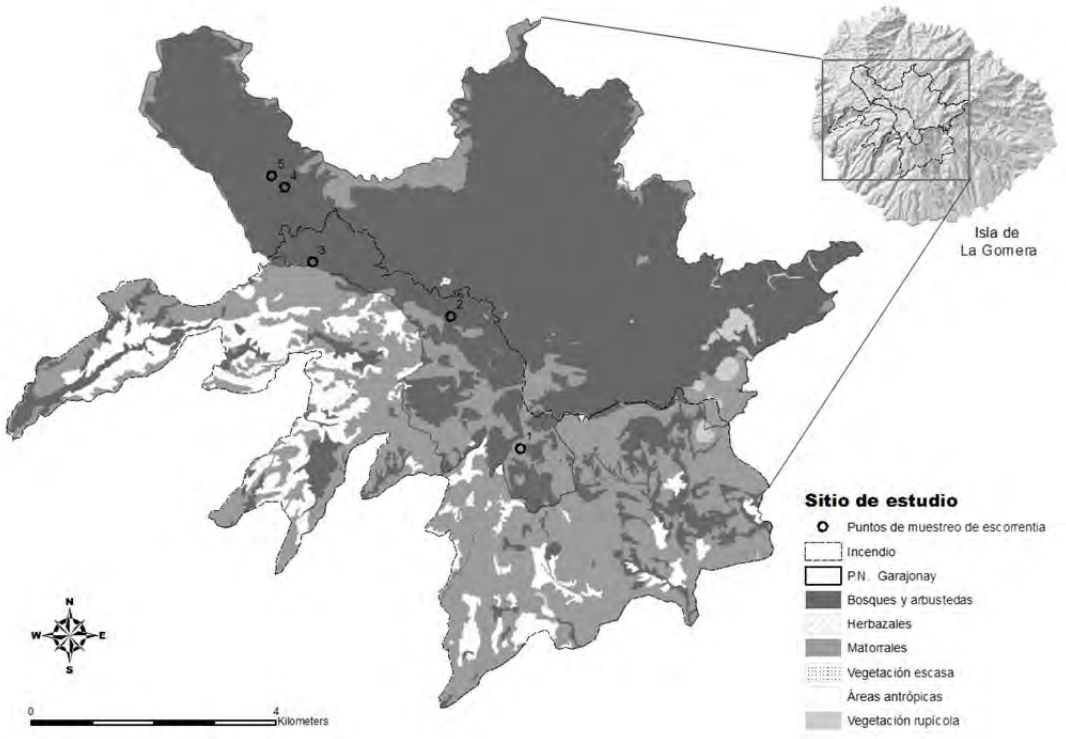


Figura 1. Sitio de estudio y puntos de muestreo de aguas de escorrentía. Mapa de vegetación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Parámetros relacionados con la producción de sedimentos: sólidos en suspensión/dispersión.

Las aguas correspondientes a las zonas Q presentaron valores significativamente mayores de TSS, turbidez, y DQO, tendiendo a descender a lo largo del tiempo (Figura 2) sin relación clara con los picos de intensidad de lluvia y la estacionalidad. Estos parámetros fueron muy bajos en las aguas NQ. En las presas, TSS y turbidez fueron significativamente más elevados en las zonas Q. El P total osciló entre 1 y 9 mg P/L en aguas de cuenca (Q y NQ), no sobrepasando 1 mg/L en las presas, siendo significativamente más alto en las cuencas Q únicamente en el primer evento. El P soluble reactivo presentó valores medios inferiores a 0.4 mg/L tanto en presas como en cuencas, con independencia del efecto del fuego. Respecto al N total, tampoco se encontraron diferencias entre aguas de cuenca Q y NQ (2-30 mg N/L); los valores medios fueron más bajos en las presas (2-14 mg N/L).

Parámetros relacionados con los componentes solubles.

Los sólidos totales disueltos (CE) presentaron una tendencia común tanto en las cuencas Q como en la NQ: se produjo un descenso progresivo que llegó a ser significativo al final de la estación seca (octubre/noviembre) aunque aumentó en el evento nº 6 (Figura 3). Contrariamente a lo obtenido en muchos estudios, no hubo diferencias significativas de la CE entre las aguas Q y NQ.

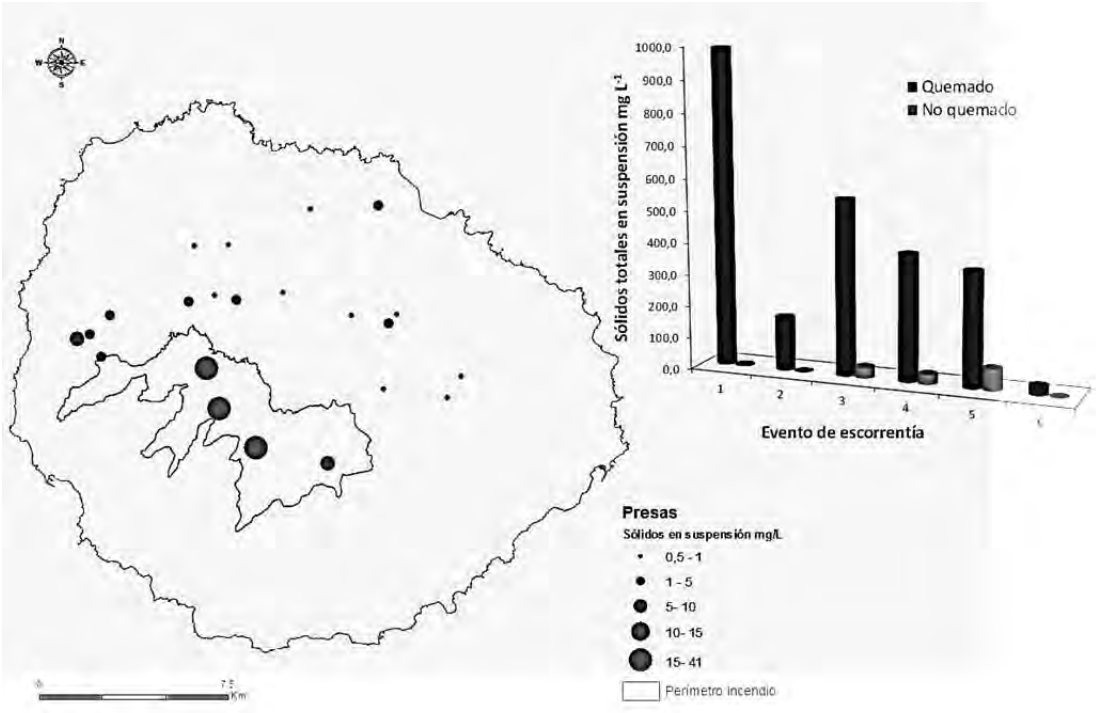


Figura 2. Sólidos en suspensión en las aguas de cuenca y presas.

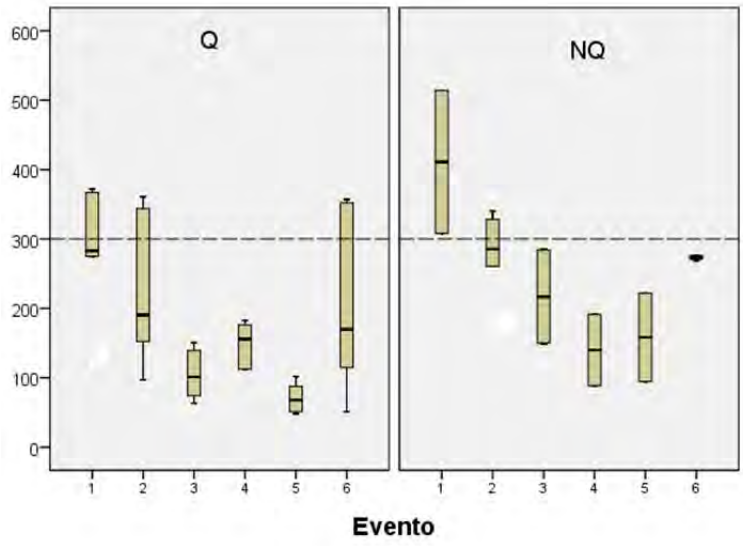
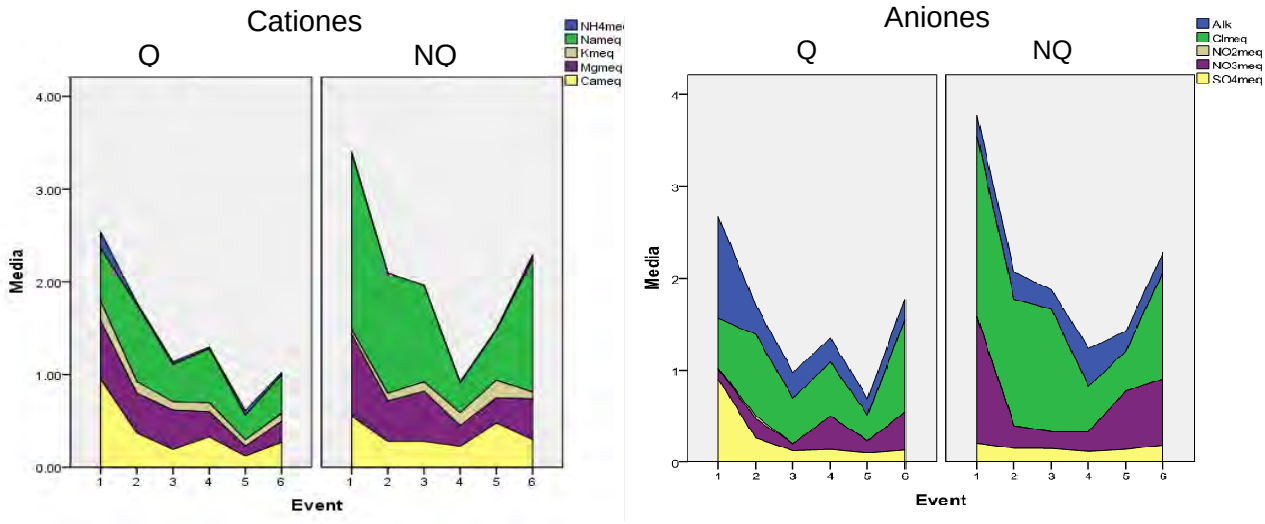


Figura 3. Evolución de la conductividad eléctrica (µS/cm) con el tiempo en zonas Q y NQ *(la línea a trazos es solo de referencia).*

Los iones Cl y Na fueron en general superiores en las aguas NQ, mientras que en las aguas Q destacaron los mayores valores de amonio, alcalinidad y sulfatos, los dos últimos, especialmente en el primer evento (Figura 4a). En la Figura 4b se muestran los diagramas de Stiff de las aguas representativos del primer evento en zonas Q y NQ. El nitrito solo estuvo presente en las aguas Q, especialmente en los dos primeros eventos. También se observaron concentraciones relativamente elevadas de nitrato, especialmente en las muestras NQ. El contenido en sales disueltas tampoco presentó diferencias entre las aguas

de presas Q y NQ, con valores medios inferiores a 0.5 dS/m. El amonio predominó sobre el nitrato en las presas Q y presentó concentraciones muy bajas en las presas NQ. Dentro de otras especies solubles destaca el comportamiento del bromuro que presentó concentraciones significativamente más elevadas en las aguas de cuencas Q (Figura 5). Este resultado puede atribuirse al bromuro del agua de mar utilizada para sofocar el incendio.

(a)



(b)

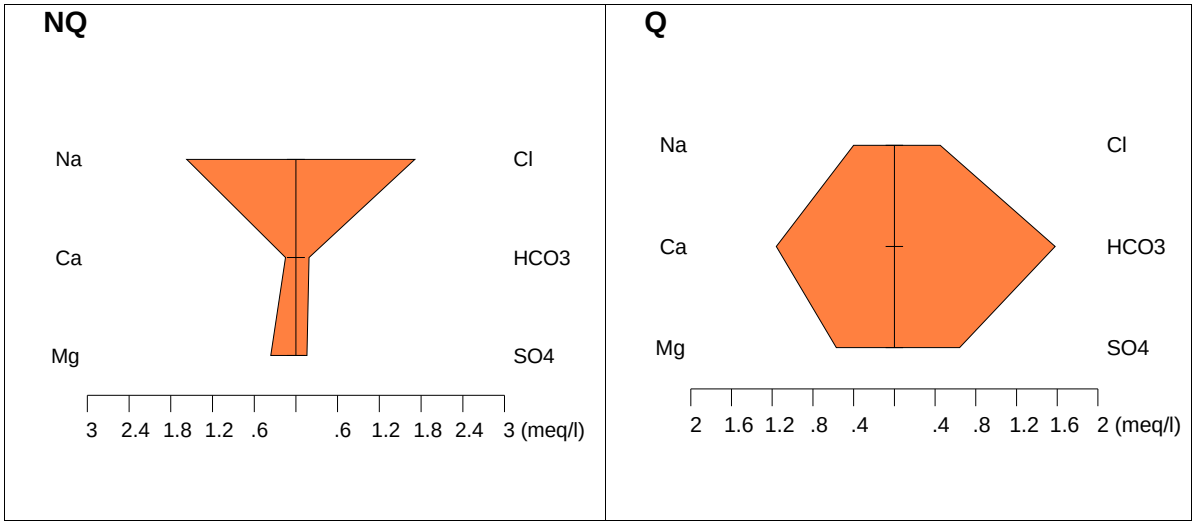


Figura 4. (a): Evolución temporal de los cationes y aniones en las aguas de escorrentía y (b): diagramas de Stiff de las aguas de escorrentía correspondientes al primer evento pluviométrico de una cuenca representativa.

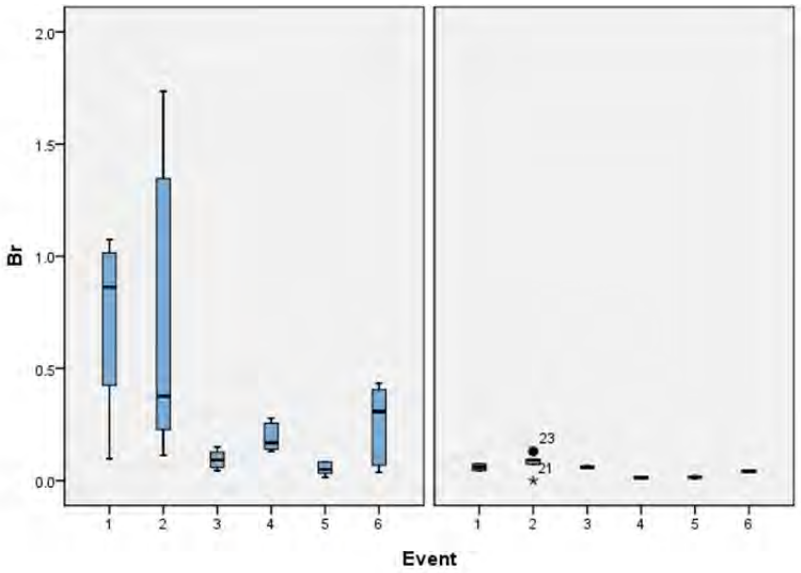


Figura 5. Evolución temporal de la concentración de bromuro (Br, mg/L) en aguas de escorrentía de zonas Q y NQ

En la Tabla 1 se presenta la variación del pH, CE y contenido en carbono orgánico total en los suelos NQ y Q. La tendencia general es la esperada: pH y CE aumentaron, mientras %C disminuyó. Es difícil, en el estado actual del trabajo, evaluar la contribución del efecto del fuego y del agua de mar utilizada para sofocarlo en el incremento de la salinidad. En cualquier caso, los datos de CE de las aguas de escorrentía no parecen consistentes con los valores de salinidad de los suelos antes de que se produjeran lluvias significativas. Por otra parte, los bajos niveles de material en suspensión en las aguas de cuenca de las zonas NQ, junto con la cantidad y tipo de sales solubles, y la baja tasa de infiltración y elevada hidrofobicidad de los horizontes A_1 de los suelos del Parque (Regalado y Ritter, 2006) sugieren un mecanismo de transporte del agua entre horizontes A_o y A_1 que ha sido descrito en bosques de distribución pluviométrica de tipo mediterráneo con el nombre de *litter interflow* (Miller, et al. 2005).

Tabla 1. Influencia del incendio en los valores medios de tres propiedades relevantes de los horizontes superficiales de los suelos (las diferencias fueron siempre significativas tanto entre suelos Q y NQ como entre los horizontes, excepto pH y %C en A_1).

horizonte	pH		CE (µS/cm)		$\%C_{total}$	
	NQ	**Q**	**NQ**	**Q**	**NQ**	**Q**
A_o	5.3	7.4	750	3725	23.5	12.8
A_1	5.7	5.8	260	709	13.3	12.6

CONCLUSIONES

A pesar de la gran variabilidad observada en cada una de las cuencas, se encontraron diferencias significativas entre las propiedades de los suelos y aguas de zonas Q y NQ. Las variaciones estacionales parecen superponerse a los efectos del incendio. La aplicación del agua de mar se reflejó en la acumulación de sales en los horizontes superficiales de los suelos, sin embargo, no hubo diferencias significativas en el contenido en sales entre aguas Q y NQ. La huella del agua de mar no se manifestó en la composición de las disoluciones de los suelos ni en las aguas Q en los primeros eventos de lluvia. Solo la presencia del ión Br^- fue significativa en este sentido. Las diferencias relativas más importantes en los componentes solubles de las aguas afectadas por el incendio se encontraron en: alcalinidad,

amonio y sulfato. Diferentes mecanismos parecen haber actuado en la movilización y transporte de sedimentos de sales solubles.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a D. Ángel Fernández López, Director del Parque Nacional de Garajonay su apoyo e implicación en el desarrollo de este estudio, particularmente en el trabajo de campo.

REFERENCIAS

American Public Health Association (1992). *Standard Methods for the Examination of Water and Waste Wate*r. APHA–AWWA–WPCF, Washington, USA.

DeBano L.F., Rice, R.M. y Conrad, E. (1979*). Soil heating in chaparral fires: effects on soil properties, plant nutrients, erosion and runoff*. USDA-FS Res. Pap. PSW-145. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Berkeley

Johnson, E.A. y Miyanishi, K. (eds) (2001). *Forest fires: behavior and ecological effects*. Academic Press, San Diego

Miller, W.W., Johnson, D.W., Denton, C., Verburg, P.S.J., Dana, G.L y Walker, R.F. 2005. *Inconspicuous nutrient laden surface runoff from mature forest Sierran watersheds.* J. Water, Air, & Soil Pollution 163:3-17

Regalado, C.M., y Ritter, A. 2006. Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of soil water repellency parameters in a laurel forest watershed. Soil Sci. Soc. Am. J. 70:1071–1081

Soil Survey Staff (1996). *Soil survey laboratory methods manual. Soil Survey Investigations*. Report No. 42. U.S. Gov. Print. Office, Washington DC, USA.

ISBN: 978-84-938046-4-0

CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE UNA PEQUEÑA CUENCA ENDORREICA EN EL ALTIPLANO VOLCÁNICO DEL NORTE DE CHILE

Christian HERRERA [1,2], Emilio CUSTODIO [3], Javier URRUTIA [1], Harry URQUETA [1], Álvaro SARMIENTO [1], Carolina GAMBOA [1].

1. Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Casilla 1280, Antofagasta, Chile. e-mail: cherrera@ucn.cl
2. Centro de Investigación Tecnológica del Agua en el Desierto (CEITSAZA), Universidad Católica del Norte, Casilla 1280, Antofagasta, Chile.
3. Departamento de Ingeniería del Terreno, Universidad Politécnica de Cataluña (UPC),Gran Capitán s/n, Ed. D-2, 08034, Barcelona, España. e-mail: emilio.custodio@upc.edu

RESUMEN

Se han estudiado las aguas de los manantiales del borde oriental de la Laguna Tuyajto, situados en la cuenca homónima, que corresponden a la descarga de aguas subterráneas de un complejo acuífero volcánico en un área árida con precipitaciones máximas de 200 mm/año. La composición isotópica de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ de los manantiales y pozos en las cuencas estudiadas indican que la recarga proviene principalmente del deshielo de nieve invernal y de episodios de lluvias intensas registradas en verano. En una primera aproximación, los gradientes de elevación isotópica de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ de la precipitación nival y pluvial indican que la recarga de los manantiales que descargan en la Laguna Tuyajto se originan a altitudes entre 4400 y 4700 m snm, superiores al límite oriental de la cuenca de la Laguna Tuyajto. Esto indica que el flujo de agua subterránea proviene de las cuencas vecinas de Pampa Colorada y Pampa Las Tecas. La relación rCl/rBr indicaría la disolución de halita, posiblemente asociada con antiguos depósitos evaporíticos cubiertos por depósitos volcánicos más recientes. La composición química e isotópica de las aguas indica interacción agua-roca de alta temperatura y la posible disolución de HCl asociado a fuentes magmáticas.

Palabras clave: *Cuencas endorreicas, Rocas volcánicas, Flujo de aguas subterráneas, Recarga, Zonas áridas.*

ABSTRACT

Spring waters from the eastern edge of the Tuyajto Lagoon, located in the basin with the same name, have been studied. They correspond to the discharge of a volcanic aquifer complex in an arid area with maximum rainfall of 200 mm/year. The $\delta^{18}O$ and $\delta^{2}H$ isotopic composition of the springs indicate that recharge is primarily from melting of winter snow and episodes of heavy rain in summer. In a first approach, the $\delta^{18}O$ and $\delta^{2}H$ isotopic elevation gradients of snow and rainfall recharge indicate that the water of springs discharging into the lagoon originate at altitudes between 4400 and 4700 m asl, above the eastern boundary of the Tuyajto Lagoon basin. This shows that groundwater flow is from the neighboring basins of Pampa Colorada and Pampa Las Tecas. The rCl/rBr ratio points to the dissolution of

halite, possibly associated with ancient evaporite deposits covered by more recent volcanic deposits. The chemical and isotopic composition of the water shows water-rock interaction at high temperature and the possible dissolution of HCl associated with magmatic sources.

Key words: *Endorheic basin, Volcanic rock, Groundwater flow, Recharge, Arid areas.*

INTRODUCCIÓN

En el Altiplano del norte de Chile se concentran un gran número de cuencas endorreicas, en cuyas depresiones se localizan lagos salinos, lagunas y salares (Risacher et al, 2003). La mayoría de estas cuencas endorreicas están situadas en un ambiente volcánico activo, a altitudes que en la mayoría de los casos exceden los 4000 m snm. (Figura 1). La característica más importante del área de estudio es el clima árido, con precipitaciones máximas de 150 a 200 mm/año en las cumbres más altas, una temperatura media anual de 1°C y una evaporación potencial anual aproximada de 1500 mm/año (Risacher et al., 1999). La Laguna Tuyajto corresponde a un cuerpo de agua libre localizado en el centro de la cuenca, a 4010 m snm, con una profundidad media de 35 cm y en una superficie máxima de 2,7 km^2. La cuenca de la Laguna Tuyajto tiene un área total aproximada de 245 km^2.

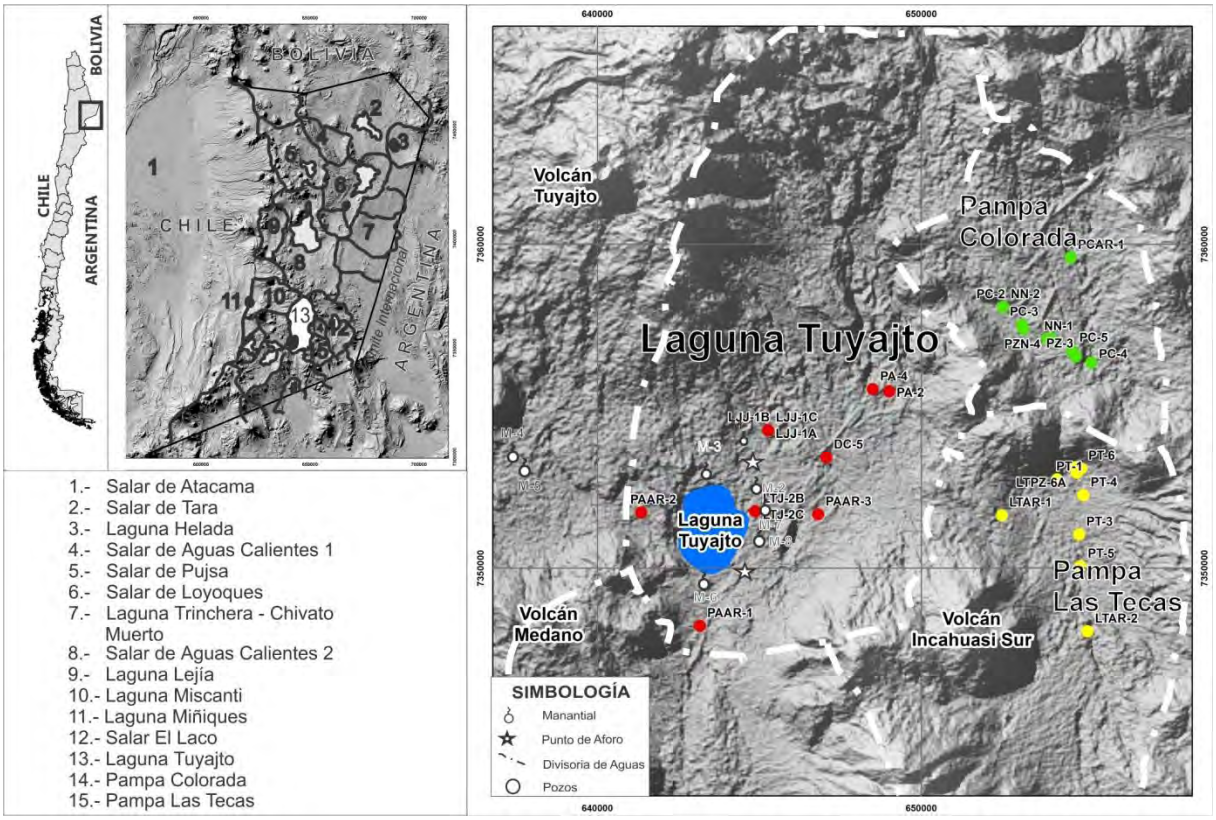


Figura 1: Mapa de ubicación de los manantiales y pozos en las cuencas de Laguna Tuyajto (en rojo), Salar de Aguas Calientes (blanco), Pampa Las Tecas (amarillo) y Pampa Colorada (verde).

MARCO GEOLÓGICO

La geología del área de estudio está dominada por la actividad volcánica desarrollada desde el Mioceno al Reciente. Las unidades más antiguas están representadas por una meseta ignimbrítica localizada en la base de los estratovolcanes del área de estudio (Figura 2). Los estratovolcanes más importantes son Incahuasi y Medano Sur, ubicados al sur del

área de estudio; se encuentran intensamente erosionados y pertenecen a un grupo definido por Ramirez y Gardeweg (1982) como Estratovolcanes I, de edad Mioceno Superior (11.7 ± 1.7 y 7.5 ± 0.9 Ma). Petrográficamente se distinguen cuatro tipos principales de lava: dacitas, andesitas de hornblenda y/o biotita, andesitas de piroxeno y basaltos-andesitas. En el Este del área de estudio (Pampa Colorada y Pampa Las Tecas) se reconocen la Ignimbrita Guaiquitina (Mioceno Superior), datada radiométricamente en 4.9 ± 0.3 Ma y la Ignimbrita Chacana (Plioceno Superior), datada en 2.4 ± 0.4 y 2.5 ± 0.3 Ma.

La erosión que afecta los diferentes volcanes del área ha producido una gran cantidad de flujos aluviales, resultando en abanicos aluviales bordeando el límite Este de la Laguna Tuyajto. Estos depósitos indican que la Laguna Tuyajto fue un lago profundo, alcanzando 25 m de profundidad hace 8000 años (Geyh et al, 1999).

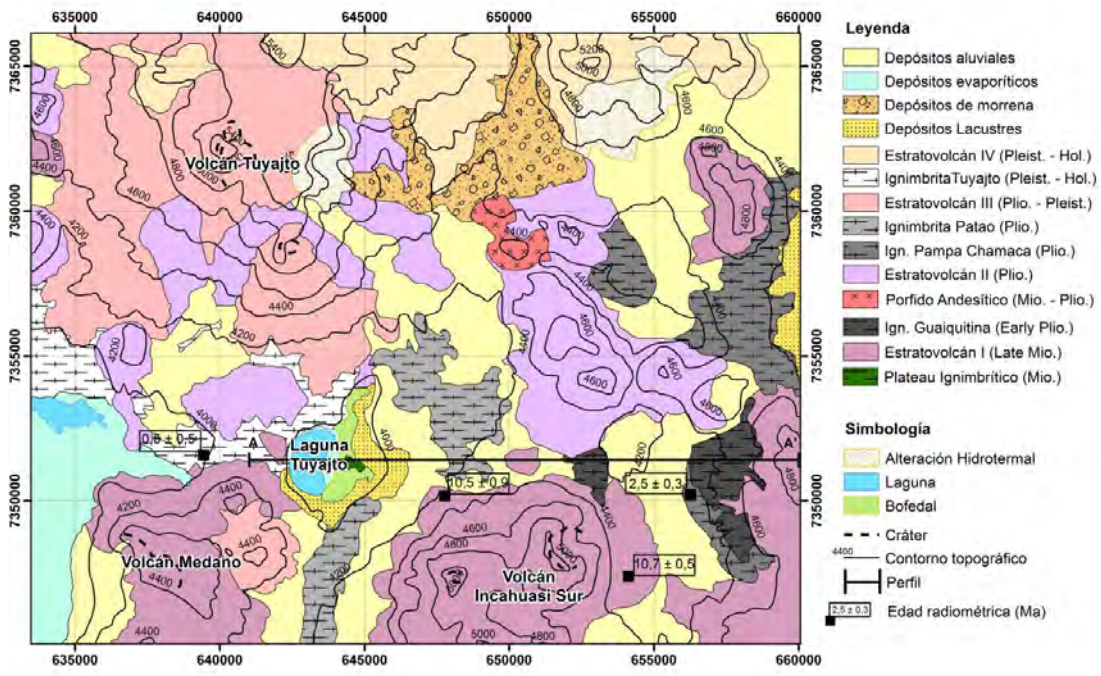


Figura 2: Mapa geológico del área de estudio. Se indica la posición del perfil A-A'.

HIDROGEOLOGÍA DE LA LAGUNA TUYAJTO

La Laguna Tuyajto es un cuerpo de agua salobre poco profundo, ubicado en el extremo suroccidental de la cuenca homónima. Recibe aportes de agua subterránea de cuatro manantiales principales (con caudales entre 75 y 245 L/s), menores de manantiales esporádicos y de humedales, todos ellos ubicados en el sector norte y oriental de la laguna.

Debido a la baja pendiente en los alrededores de la laguna, ésta presenta cambios significativos en su volumen y extensión cuando los caudales de los manantiales varían estacionalmente o es mayor la evaporación a causa de la alta radiación solar característica del norte chileno. El continuo descenso de la superficie de la laguna registrado entre diciembre de 2003 y enero de 2004 se corresponde con los reducidos caudales en manantiales a finales de enero de 2004 (90 L/s) y la mayor tasa de evaporación.

La sensibilidad de este sistema a los cambios estacionales producidos en la descarga de manantiales y evaporación, podría relacionarse con las extensas formaciones de ignimbritas descritas en los terrenos volcánicos del norte de Chile (De Silva et al, 1989;

Stern et al., 2007). Una de estas unidades geológicas, ubicada en la base de los edificios volcánicos del área de estudio, funcionaría como límite inferior para el acuífero de la Laguna Tuyajto, actuando como una capa de baja permeabilidad hidráulica vertical (Montgomery et al., 2003). En los reconocimientos geológicos de campo se ha visto que la presencia de esta ignimbrita basal genera la aparición de los manantiales anteriormente descritos (Figura 3).

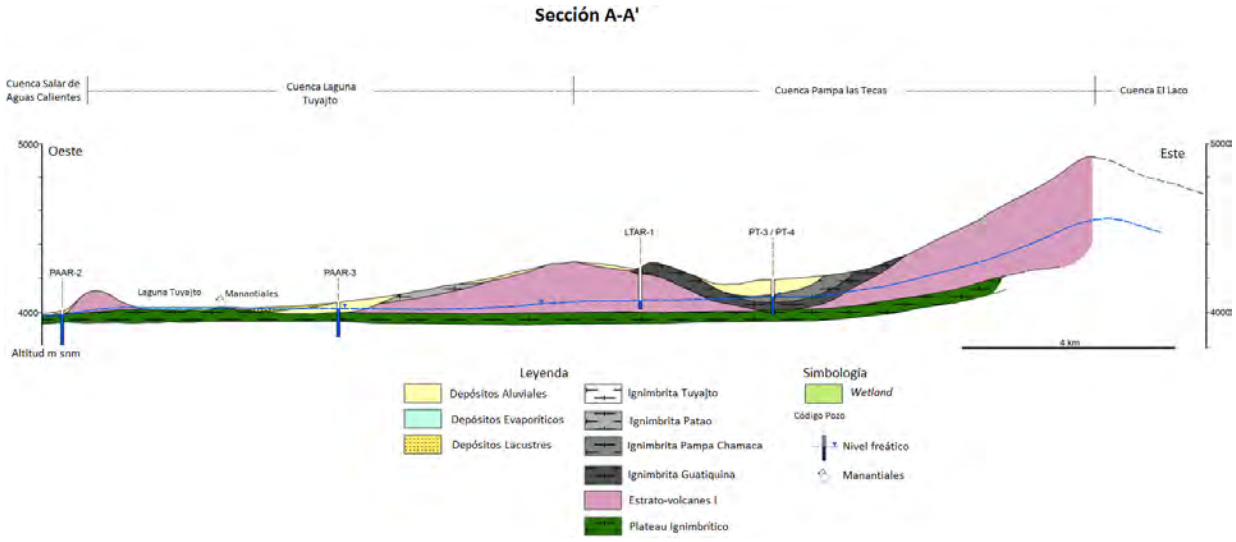


Figura 3: Sección esquemática del área de estudio. Información obtenida mediante campañas de terreno, cartas geológicas regionales y descripción de pozos del estudio EIA (2007).

Flujo del agua subterránea

La mayor parte de los datos para recrear la piezometría del nivel freático proviene de pozos ubicados en la parte oriental de la zona de estudio. Los pozos de observación y pruebas de bombeo fueron realizados en el estudio desarrollado por EIA (2007). En la Figura 4 se observa la altitud de los niveles freáticos de las cuencas Laguna Tuyajto, Las Tecas y Pampa Colorada. Aquellos niveles apuntan a una conexión subterránea entre estas cuencas, con un flujo de agua con dirección y sentido general de este a oeste y cuyas descargas ocurren en el sector oriental de la Laguna Tuyajto. Los bajos gradientes hidráulicos en las cercanías de la laguna y en la zona central de las cuencas Las Tecas y Pampa Colorada indican una transmisividad hidráulica elevada asociada a depósitos sedimentarios permeables, como gravas de antiguos abanicos aluviales, consistente con los ensayos de bombeo, los cuales indican transmisividades de hasta 976 m^2/d.

HIDROGEOQUÍMICA

Las aguas subterráneas son del tipo clorurado sódico con un leve exceso de sulfato en algunas muestras. Las aguas de los manantiales ubicados en el sector este de la Laguna Tuyajto también son del tipo clorurado sódico y tienen la misma marca química que las aguas subterráneas en pozos de las cuencas Pampa Colorada y Pampa Las Tecas, mientras que los manantiales ubicados al norte de la Laguna Tuyajto y en el Salar de Aguas Calientes son del tipo clorurado-sulfatado sódico. La variación espacial de la composición química de las muestras se observan en los diagramas de Stiff modificados (Figura 5).

Las aguas de los manantiales y de los pozos de Pampa Colorada y Pampa Las Tecas tienen contenidos variables en ión sodio y cloruro, con aumento de las concentraciones de cloruro acompañado por un aumento en proporciones aproximadamente equivalentes de sodio. Sin embargo, existe un ligero exceso de cloruro respecto al sodio, que resulta difícil

de explicar, ya que el aporte de cloruro por la alteración de rocas ígneas seria despreciable, por la escasa presencia de dicho elemento en este tipo de rocas. Los valores de la relación rCl/rBr en los pozos de Pampa Las Tecas y Pampa Colorada varían de 2000 a 10.000, lo que indica la posibilidad de disolución de halita en el agua (Custodio y Herrera, 2000; Alcalá y Custodio, 2008). En la Figura 6 se grafica la relación rCl/rBr vs cloruro, incluyendo datos de lluvia obtenidos al oeste del área de estudio, en el Salar de Atacama; muestra de manera general un aumento de la relación rCl/rBr a medida que aumenta el contenido de cloruro, esperable según la hipótesis de disolución de halita.

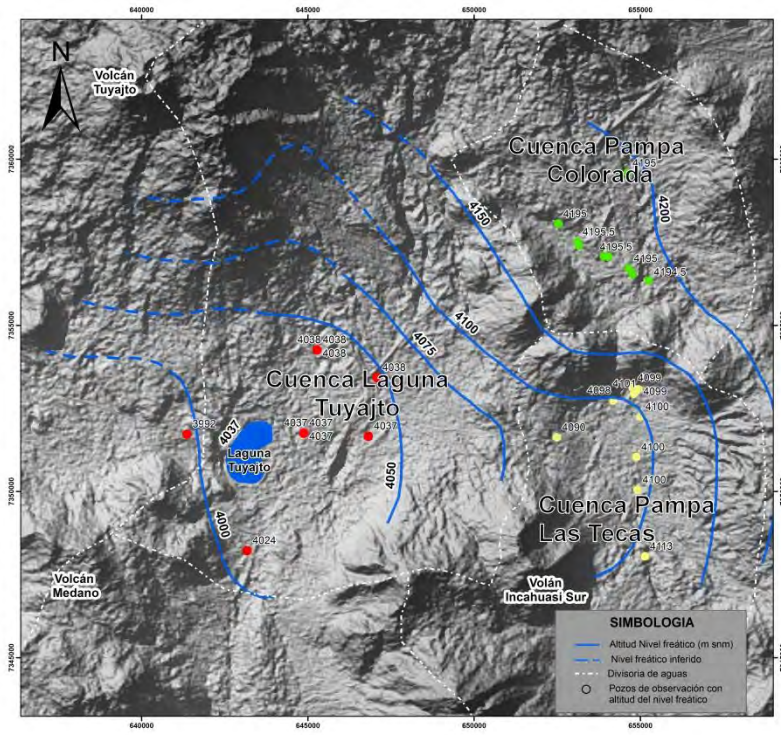


Figura 4: Mapa piezométrico del área de estudio. El flujo de aguas subterráneas ocurre desde áreas de mayor recarga a zonas deprimidas (este a oeste).

Los valores de la relación rSO_4/rCl en muestras de lluvia varían de 0.26 a 0.28, mientras que en los manantiales tienen un rango mayor de 0.16 a 0.54. Las aguas subterráneas presentan una mayor variación de esta relación, de 0.01 a 0.45. Las aguas con valores menores de rSO_4/rCl tienen una composición química cercana a la de las muestras de lluvia, mientras que algunos valores elevados de la relación que se encuentran en aguas diluidas pueden explicarse por meteorización de rocas volcánicas. Otros valores altos de rSO4/rCl, que no se encuentran en agua diluida, pueden ser producto de la difusión atmosférica de la oxidación de azufre nativo desde una zona de alteración solfatárica en el volcán Tuyajto.

Considerando el carácter termal del manantial M-1 localizado al norte de la Laguna Tuyajto, no se puede descartar la disolución de HCl en las aguas subterráneas descargando en los manantiales, aunque esto aún se está por estudiar.

INTERPRETACIÓN DE DATOS ISOTÓPICOS.

La Figura 7 muestra la composición isotópica de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ de las aguas subterráneas obtenidas en los manantiales del borde de la Laguna Tuyajto, en los pozos de las cuencas Pampa Colorada y Pampa Las Tecas y en el Salar de Aguas Calientes, junto con la composición isotópica de las precipitaciones por lluvia y nieve.

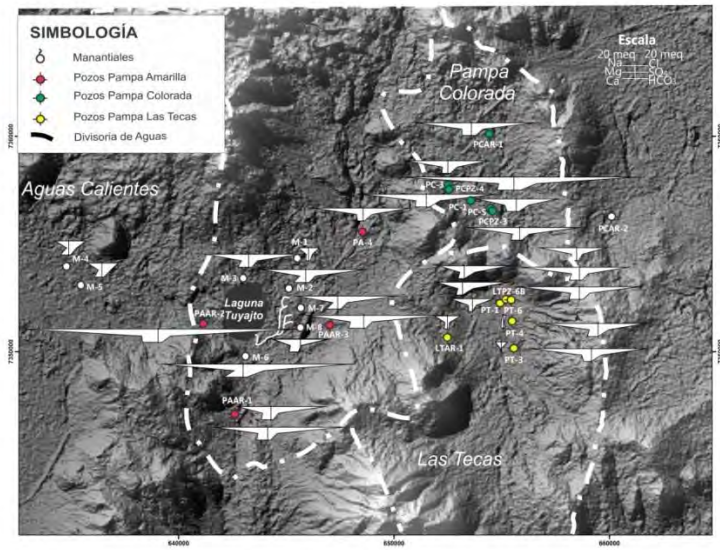


Figura 5: Diagramas de Stiff modificados de las aguas de manantiales ubicados en la Laguna Tuyajto y en el Salar de Aguas Calientes y de aguas subterráneas de pozos en Pampa Colorada, Pampa Las Tecas y Pampa Amarilla.

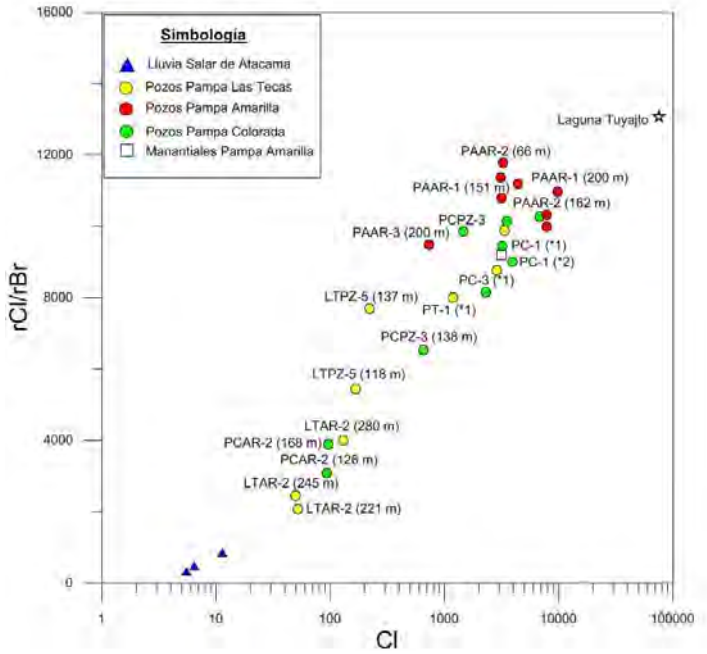


Figura 6: Gráfico de la relación rCl/rBr versus Cl. Muestra de manera general un aumento de rCl/rBr a mayor salinidad. Se incluyen datos de lluvia del flanco oeste del Salar de Atacama. r=meq/l. Los valores en paréntesis son la profundidad a la cual se tomó la muestra.

Como resultado de la escasez de lluvias registradas en el norte de Chile es difícil hacer una caracterización profunda de la precipitación. La composición isotópica de $\delta^{18}O$ de la nieve varía con la altitud entre -6,52 y -10,93 ‰, que en general es más ligera que la lluvia (-1,84 y -10,31 ‰) (Figura 7). Ambas se encuentran entre la línea meteórica mundial y la línea meteórica paralela obtenida por Chaffaut (1998), de exceso de deuterio de 15,7‰.

El agua de los manantiales ubicados en la parte norte de la Laguna Tuyajto y el Salar de Aguas Calientes tiene una composición isotópica de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ muy cercana a la del agua meteórica y temperatura menor que las aguas que surgen en la ladera sur del volcán

Tuyajto, cuya recarga es a partir de la fusión de nieve en las partes altas. Esto puede indicar un viaje más largo de las aguas, las que se ven afectadas por interacción agua-roca hasta que se produce su descarga en los manantiales de la Laguna Tuyajto.

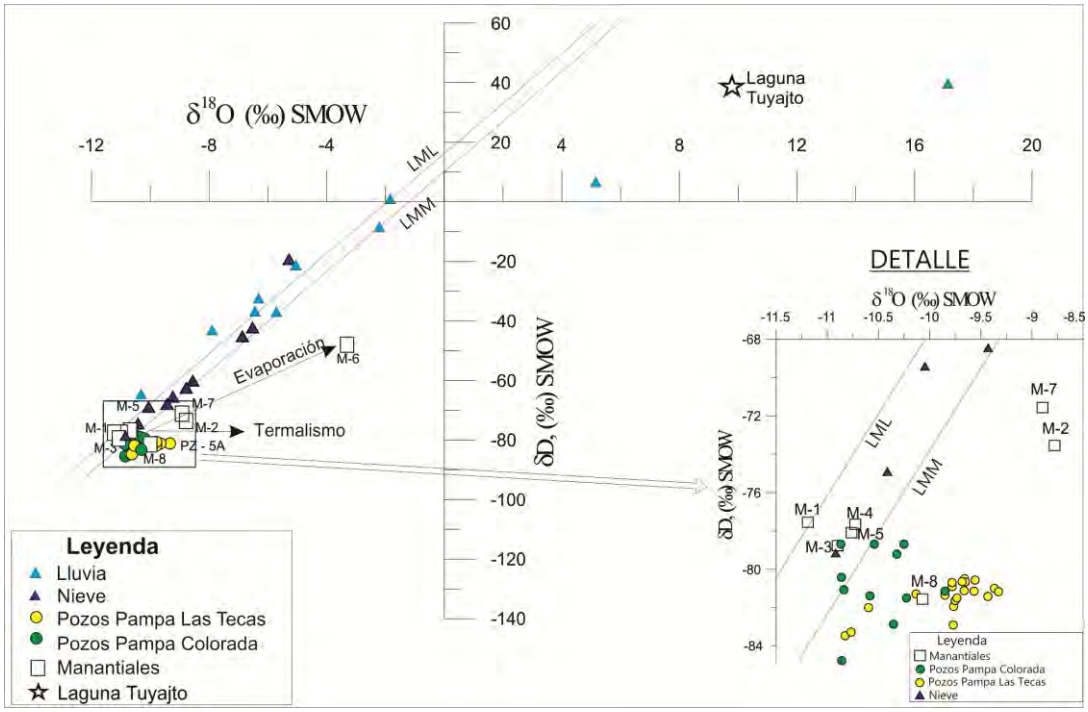


Figura 7: Composición isotópica de $\delta^{18}O$ y δD de aguas de manantiales, precipitaciones en el área de estudio y de aguas subterráneas de pozos. LMM: Línea meteórica mundial. LML: Línea meteórica local, paralela con un exceso de deuterio de 15,7 ‰ SMOW.

Las muestras de agua subterránea de Pampa Colorada, Pampa Las Tecas y M-8, tienen composiciones isotópicas enriquecidas en $\delta^{18}O$ con respecto al agua meteórica. Una explicación es que el agua meteórica original que recarga el sistema acuífero haya sido afectada por intercambio isotópico de alta temperatura, lo que es plausible teniendo en cuenta el entorno volcánico del acuífero y el reconocimiento de aguas termales en las cercanías de la Laguna Tuyajto. Según la topografía montañosa de este entorno volcánico, con aguas meteóricas que se infiltran a diferentes altitudes, se esperan variaciones en la composición isotópica del agua de recarga. El valor más negativo de $\delta^{2}H$ de algunas muestras obedecería a la composición isotópica más ligera del agua meteórica original. El contenido isotópico de $\delta^{18}O$ en muestras de nieve versus la altitud indican una recarga para las aguas de manantiales variables entre los 4100 m snm. a 4700 m snm., con algunos pozos mostrando efectos de termalismo. Considerando el $\delta^{2}H$ se obtienen altitudes de recarga de aguas subterráneas entre 4100 y 4600 m snm.

CONCLUSIONES

La composición química de las aguas de manantiales de la Laguna Tuyajto y de los pozos de las cuencas Pampa Colorada y Pampa Las Tecas está controlada por la disolución de minerales evaporíticos y en parte por la interacción agua-roca a alta temperatura. La disolución de halita y posiblemente sulfato puede asociarse a depósitos salinos cubiertos por flujos volcánicos. El exceso de cloruro sobre el ión sodio podría ser debido a cambios iónicos, pero cabría considerar que sea debido a la incorporación de HCl de desgasificación magmática, lo que favorece la alteración de la roca, aunque esto aún se está por estudiar.

La composición de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ de muestras fluviales y nivales del área de estudio y su comparación con la composición isotópica de las aguas de manantiales indica que la recarga es causada principalmente por la fusión de nieves durante el invierno y en menor medida por lluvias intensas ocurridas en verano.

La composición isotópica de $\delta^{2}H$ de aguas de manantiales ubicadas en límite este de la Laguna Tuyajto indica que la recarga de estas aguas se produjo a altitudes de 4400 m s.n.m., fuera de los límites de la cuenca de la Laguna Tuyajto. Esto muestra que existe un flujo de aguas subterráneas desde las cuencas vecinas de Pampa Las Tecas y Pampa Colorada.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación es patrocinada por el Proyecto Anillos ACT 1203 del Programa de Investigación Asociativa (PIA) de CONICYT en colaboración con el Departamento de Geología de la Universidad Católica del Norte.

REFERENCIAS

Alcalá FJ, Custodio E. *Using the Cl/Br ratio as a tracer to identify the origin of salinity in aquifers in Spain and Portugal.* Journal of Hydrology 2008; 359 (1-2): 189-207.

Chaffaut, I. (1998). *Precipitations d'altitude, eaux souterraines et changements climatiques de l'Altiplano Nord-Chilien*. Thèse de Doctorat, Université Paris XI Orsay, 274 pp.

Custodio, E; Herrera, C. 2000. *Utilización de la relación Cl/Br como trazador hidrogeoquímico en hidrología subterránea.* Boletín Geológico y Minero, 111 (4): 49-67.

Da Silva, S. L. 1989. *Geochronology and stratigraphy of the ignimbrites from the 21°30'S to 23°30'S portion of the Central Andes of Northern Chile.* J. of Volcanology and Geothermal Research, 37: 93–131

Geyh, M.; Grosjean, M.; Nuñez, L.; Schotterer, I. 1999. *Radiocarbon reservoir effect and the timing of the Late-Glacial/Early Holocene Humid Phase in the Atacama Desert (Northern Chile). Quaternary Research,* 52: 143-153.

Minera Escondida Limitada, 2007. *Estudio de impacto ambiental: Suministro de agua pampa Colorada.* Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, Chile.

Montgomery, E.; Rosko, M.; Castro, S.; Keller, B.; Bevacqua, P. 2003. Interbasin underflow between closed Altiplano Basins in Chile. *Groundwater*, 41 (4); 523-531.

Ramírez, C.; Gardeweg, M. 1982. *Hoja Toconao, Región de Antofagasta*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, No. 54, 122p.

Risacher, F; Alonso, H; Salazar, C. 1999. *Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II y III Regiones – Chile*. Dirección General de Aguas. 3; 461 p.

Risacher, F.; Alonso, H.; Salazar, C. 2003. *The origin of brines and salts in Chilean salars: a hydrochemical review.* Earth-Science Reviews, 63, (3-4); 249-293.

Stern, C., Moreno, H., López-Escobar, L., Clavero, J., Lara, L., Naranjo, J., Parada, M., Skewes, A. 2007. *Chilean Volcanoes. In Geology of Chile*, Moreno, T., Gibbons, W. (ed.). Geological Society of London. P. 289-308

ISBN: 978-84-938046-4-0

ENSAYO DE CORRELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS GEOFÍSICOS E HIDROGEOLÓGICOS DE LOS DEPÓSITOS VOLCÁNICOS DE LA CALDERA DE BANDAMA (GRAN CANARIA)

Mahjoub HIMI[1], Esmeralda ESTÉVEZ[2], Raúl LOVERA[1], Alex SENDRÓS[1], María del Pino PALACIOS-DIAZ[3], Josefina C. TAPIAS[4], María del Carmen CABRERA[2], Albert CASAS[1]

[1] Departamento de Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica. Universidad de Barcelona. 08028-Barcelona. himi@ub.edu; rlovera@ub.edu; alex.sendros@ub.edu; albert.casas@ub.edu
[2] Departamento de Física (GEOVOL), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 35017-Las Palmas de Gran Canaria, España. eestevez@proyinves.ulpgc.es; mcarmen.cabrera@ulpgc.es
[3] Departamento de Patología Animal, Producción Animal, Bromatología y Tecnología de los Alimentos (GEOVOL). mpalacios@dpat.ulpgc.es
[4] Departamento de Productos Naturales, Biología Vegetal y Edafología. Universidad de Barcelona. 08028-Barcelona. jtapias@ub.edu

RESUMEN

La geometría y la conductividad hidráulica de la zona no saturada es difícil de estudiar a partir de las técnicas tradicionales, como la toma de muestras en catas que aportan datos superficiales o los sondeos mecánicos, que son caros y proporcionan información puntual. Los métodos geofísicos no destructivos, y entre ellos la tomografía de resistividad eléctrica pueden ser de aplicación para la caracterización de la zona no saturada en áreas volcánicas. Las coladas de lava y los depósitos piroclásticos presentan un amplio rango de valores de resistividad en función del grado de fracturación y meteorización de las lavas, y de la porosidad y textura de los piroclastos. Con el objetivo de caracterizar la geología del subsuelo bajo el campo de Golf de Bandama (Gran Canaria) se ha realizado una campaña de prospección geofísica mediante tomografía de resistividad eléctrica. Esta técnica ha permitido delimitar la geometría de las formaciones geológicas existentes gracias al elevado contraste de resistividad eléctrica que presentan. Posteriormente, en afloramientos representativos se ha medido simultáneamente el valor de resistividad eléctrica de cada una de las litologías presentes y se han tomado muestras inalteradas para la medida en el laboratorio de la conductividad hidráulica. Finalmente, se ha establecido una correlación estadística entre ambas variables y se ha elaborado un modelo 3D de valores de conductividad hidráulica para evaluar la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación en las distintas zonas del campo de golf.

Palabras clave: *Depósitos volcánicos, resistividad eléctrica, conductividad hidráulica, zona no saturada, Gran Canaria*

ABSTRACT

The geometry and the hydraulic conductivity of the unsaturated zone is difficult to study from traditional techniques, like samples from trenches that normally provide surficial data or boreholes, that are expensive and provide local information. Non-destructive geophysical

techniques and among them the electrical resistivity tomography method can be applicable in volcanic areas, where the lava flows and pyroclastic deposits have a wide range of values depending on the degree of fracturing and weathering of lava flows, and porosity and texture of the pyroclastic deposits. In order to characterize the subsurface geology below the golf course of Bandama (Gran Canaria) has conducted a campaign of electrical resistivity tomography profiles. This technique allowed to define the geometry of the existing geological formations by their high electrical resistivity contrast. Subsequently, in representative outcrops has been simultaneously measured the value of resistivity of each of these lithologies and undisturbed samples for measurement taken in the laboratory of hydraulic conductivity. Finally a statistical correlation between the two variables has been established and a 3D model of values of hydraulic conductivity has been built in order to evaluate the aquifer vulnerability to groundwater pollution at different zones of the golf course.

Key words: *volcanic deposits, electrical resistivity, hydraulic conductivity, unsaturated zone, Gran Canaria*

INTRODUCCIÓN

El uso de aguas regeneradas para el riego es una práctica cada vez más utilizada y en Gran Canaria se ha llevado a cabo desde hace más de treinta años. Según el Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria, en la actualidad supone más del 8% del total de recursos hídricos de la isla, con un destino casi exclusivo para riego. Sin embargo, se desconoce en gran medida los efectos que puede tener esta práctica en el medioambiente. Por ello, se ha seleccionado el campo de golf de Bandama donde se ha llevado a cabo un estudio detallado conducente a evaluar la vulnerabilidad a la contaminación a las aguas subterráneas como consecuencia del riego que se lleva a cabo en el Campo de Golf de Bandama desde 1976 con aguas regeneradas procedentes de la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) de Las Palmas de Gran Canaria (Estévez et al, 2010).

En este trabajo se presentan los resultados del estudio geofísico llevado a cabo para caracterizar la parte superficial de la zona no saturada con el objetivo de evaluar la dinámica del drenaje subsuperficial del agua que se infiltra desde la superficie del terreno, tanto si se trata de agua de lluvia como de excedentes de riego.

El campo de golf está situado en la cuenca del barranco de Las Goteras, al NE de Gran Canaria (Figura 1). Los materiales que afloran en la zona son lavas y piroclastos (de caída y de flujos tipo surge) de naturaleza básica, muy poco alterados y que han sido datados por C-14 en 1970 ± 70 años BP (Hansen y Moreno, 2008).. Estos materiales fueron emitidos en las erupciones que dieron lugar al Pico y la Caldera de Bandama y los depósitos piroclásticos cubrieron más de 50 km^2 de superficie (Hansen y Moreno, 2008). La Caldera de Bandama, de origen freatomagmático, tiene 900 m de diámetro y 250 m de profundidad y el campo de golf se localiza en su sector occidental. Por tanto, la ladera E de la caldera representa un corte natural que permite la observación directa de la zona no saturada, conformada por una capa superficial de piroclastos originados en la erupción de la propia caldera que cubren brechas volcánicas (in situ y deslizadas) Pliocenas pertenecientes al Grupo Roque Nublo, que a su vez están situados sobre materiales fonolíticos miocenos, entre los que se intercalan conglomerados aluviales pertenecientes a la Formación Detrítica de Las Palmas.

Desde el punto de vista hidrogeológico, la isla se considera un acuífero único con una superficie piezométrica en forma de domo que alcanza máximos en el centro de la isla. El acuífero subyacente al campo de golf está formado por materiales volcánicos y el flujo del agua subterránea sigue el esquema general para la isla de cumbre a costa. El nivel

piezométrico general se sitúa a más de 250 m de profundidad y a 100 m por debajo del fondo de la caldera. El establecimiento de una red de control de puntos de agua a lo largo del barranco de las Goteras ha permitido caracterizar la calidad de las aguas subterráneas del sistema acuífero que explota fundamentalmente materiales fonolíticos por medio de pozos de diferentes profundidades (Cabrera et al, 2009) y también la presencia de contaminantes emergentes y sustancias prioritarias (Estévez et al, 2012).

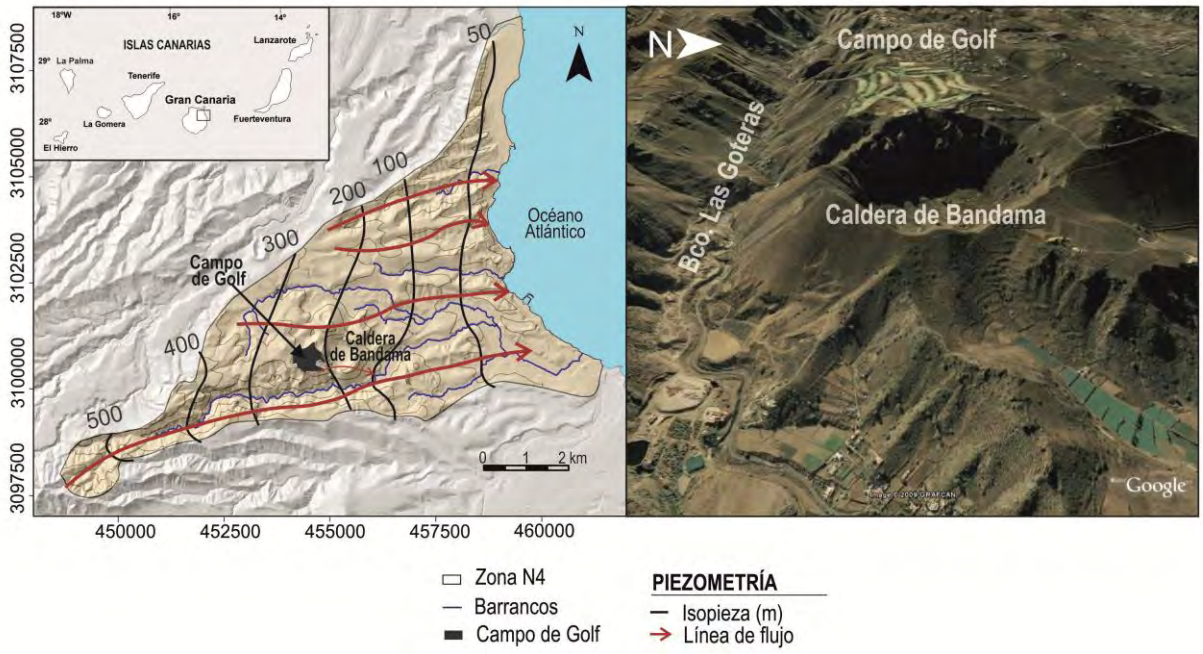


Figura 1. Situación del campo de golf de Bandama con indicación de la piezometría de la zona (Cabrera et al., 2009). La imagen derecha muestra una perspectiva de la Caldera de Bandama y del Campo de golf desde el Este en la que se observa el corte natural de la sección de zona no saturada debajo del campo de golf (Google Maps).

METODOLOGÍA

Para la consecución de los objetivos planteados se han aplicado dos metodologías complementarias, por un lado la tomografía de resistividad eléctrica para caracterizar la geometría y heterogeneidad del subsuelo y por otro la medida de la conductividad hidráulica en muestras representativas de los materiales volcánicos con la finalidad de poder establecer una correlación entre ambas variables.

Tomografía eléctrica

El método geofísico utilizado para caracterizar el subsuelo del campo de golf de Bandama ha sido la tomografía de resistividad eléctrica (Griffiths y Barker, 1993). Para conseguir el objetivo propuesto de determinar las variaciones laterales y verticales de los materiales situados bajo el campo de golf se han efectuado 18 perfiles cubriendo lo más homogéneamente posible la totalidad del campo. Cada perfil tiene 94 m de longitud y alcanza aproximadamente 20 m de profundidad, suficiente para los objetivos del estudio (Figura 2).

Las secciones de tomografía eléctrica se adquirieron con un resistivímetro SYSCAL PRO de 48 electrodos con un dispositivo Wenner-Schlumberger y 2 metros de separación entre

los electrodos. Las coordenadas UTM del centro, inicio, final y de cada perfil se midieron con un navegador GPS Garmin que en las condiciones óptimas de trabajo del campo de golf proporcionaron una precisión de ± 5 m.

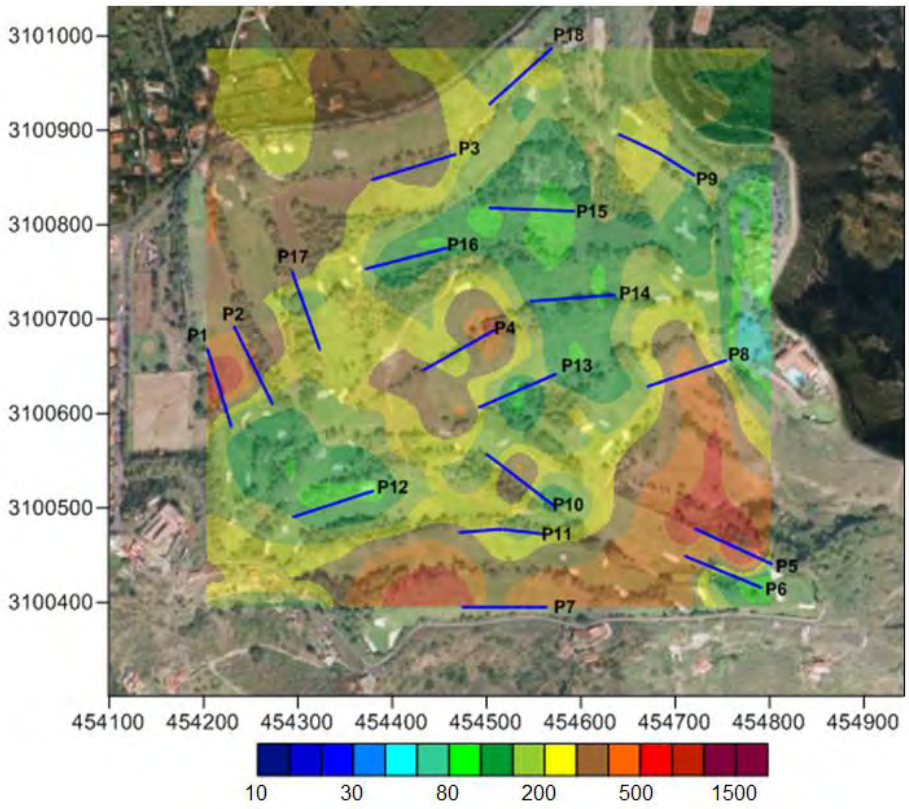


Figura 2. Distribución de los valores de resistividad eléctrica interpolada a partir de las medidas de los perfiles de tomografía eléctrica.

Para invertir los valores de resistividad aparente medidos y obtener la sección que se aproxime a la distribución de resistividades reales del subsuelo se utilizó el programa RES2DINV (Loke, 2004). En este método, el modelo de subsuelo se divide en celdas de dimensiones determinadas cuyos valores de resistividad eléctrica se modifican de forma iterativa hasta conseguir un ajuste aceptable entre los datos experimentales y la respuesta teórica del modelo, siguiendo un proceso de optimización no-lineal de ajustes por mínimos cuadrados (Loke y Barker, 1996).

Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica saturada se ha medido a partir de muestras inalteradas de suelos y depósitos volcánicos tomadas con precaución directamente de los afloramientos seleccionados en cilindros estandarizados de 250cm^3 de volumen. Una vez en el laboratorio, los cilindros de suelo previamente preparados fueron humedecidos desde la parte inferior hasta alcanzar la saturación y posteriormente insertados en la cápsula de medida del equipo formado por un permeámetro UMS Ksat cuya metodología se basa en la inversión de la ley de Darcy.

Una característica del equipo es que permite determinar la conductividad hidráulica de dos formas distintas: a carga constante (constant head) y a carga variable (falling head) de acuerdo con las normas DIN ISO 19683-9 y DIN ISO 18130-1 respectivamente. Otra ventaja

de este sistema es que las medidas se obtienen de forma digital y totalmente automatizada mediante una conexión USB del equipo a un ordenador. Los resultados obtenidos se han procesado con el software de adquisición y análisis de datos KSAT VIEW1.0©, que permite visualizar los datos y calcular de forma inmediata la conductividad hidráulica saturada.

RESULTADOS OBTENIDOS

Tomografía eléctrica

Las secciones de tomografía eléctrica obtenidas muestran un elevado contraste de resistividad, con valores que oscilan entre menos de 30 ohm·m a más de 3000 ohm·m. Los resultados obtenidos después del proceso de inversión han permitido delimitar tres unidades bien definidas por sus valores de resistividad eléctrica. Una capa superficial de suelo que presenta unos niveles medios de resistividad, con mayor potencia en las áreas con suelo transportado, un segundo nivel de piroclastos porosos de alta resistividad eléctrica, que disminuye su grosor al aumentar la distancia al centro de emisión (Pico y Caldera de Bandama) y una capa profunda de baja resistividad eléctrica, atribuida a las brechas volcánicas del Grupo Roque Nublo.

Las variaciones de grosor y propiedades de estas tres electrofacies características pueden apreciarse claramente a partir de la comparación entre las secciones de los perfiles 1 y 3 (Figura3), adquiridas respectivamente al oeste y centro del campo en dirección a la caldera de Bandama (ver figura 2), donde el grosor de los piroclastos aumenta, así como la profundidad a que se sitúa la capa debrechas volcánicas Roque Nublo.

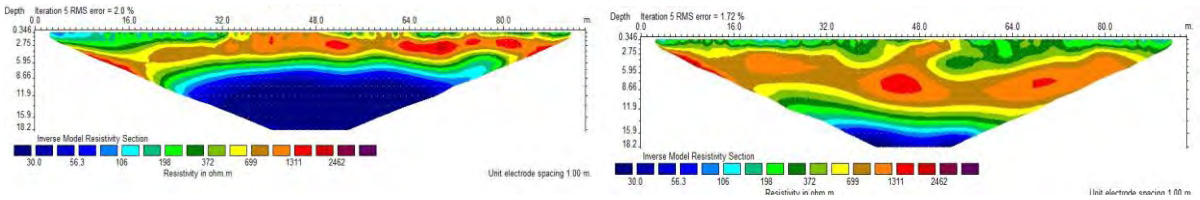


Figura 3. Secciones de resistividad eléctrica del perfil 1 (izquierda), donde el nivel de piroclastos es delgado y la profundidad del sustrato ignimbrítico de baja resistividad (> 30 ohm·m) aparece a unos 5 m de profundidad y del perfil 3 (derecha), donde se observa que la capa de piroclastos es bastante más gruesa y que la profundidad del sustrato ignimbrítico de baja resistividad se encuentra a más de 15 m de profundidad. La situación espacial de los perfiles se muestra en la Figura 2.

Con el conjunto de los más de 18000 valores de resistividad eléctrica obtenidos después del proceso de inversión (más de mil medidas en cada una de las 18 secciones de tomografía eléctrica) se ha elaborado un modelo 3D de distribución de resistividad eléctrica, del cual puede derivarse una primera interpretación cualitativa a cerca de las litologías predominantes en el subsuelo del campo de golf. La distribución de los valores de resistividad eléctrica sobreimpuesto a la situación de los perfiles de tomografía eléctrica (ver figura 2) permite apreciar una notable variabilidad de este parámetro.

Conductividad hidráulica

Las medidas de conductividad hidráulica han variado desde valores mínimos inferiores a 500 cm/día para los piroclastos de flujo muy compactos (surges) hasta valores máximos superiores al límite de medida del instrumento, que es de 20000 cm/día para los piroclastos de caída de grano grueso (de bombas a lapilli). Por otra parte, los valores de conductividad

hidráulica saturada medida por los dos métodos, carga constante y carga variable, han sido muy congruentes, aunque no iguales, como se muestra en la Figura 4.

En promedio, los valores obtenidos por el método de carga constante son entre un 8 y un 30% más elevados que por el método de carga variable. Según Klute y Dirksen (1986) el método de carga constante es más exacto en el rango de conductividad hidráulica entre 10^{-3} a 10^{-7} cm/s, mientras que el permeámetro de carga variable es mejor para suelos con conductividad hidráulica en el rango desde mayor de 1 cm/s a 10^{-5} cm/s. Como las muestras de la Caldera de Bandama abarcan ambos grupos, se ha considerado más representativo asignar a cada muestra la media aritmética del valor obtenido por cada uno de los métodos. Los valores de conductividad hidráulica saturada se han comparado con las medidas de resistividad eléctrica medidas en el propio campo de golf a partir de los perfiles de tomografía eléctrica, o bien mediante sondeos paramétricos utilizando un dispositivo Wenner (a=20 cm) sobre los mismos afloramientos.

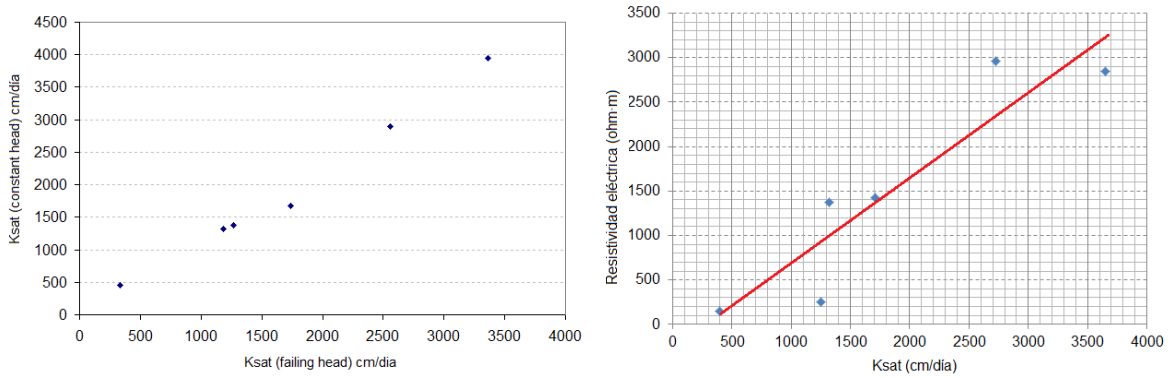


Figura 4. Relación entre las medidas de conductividad hidráulica a carga constante y carga variable (izquierda) y correlación entre los valores promedio de conductividad hidráulica saturada y resistividad eléctrica (derecha) de las muestras.

DISCUSIÓN

La contaminación de las aguas subterráneas por diferentes mecanismos, entre los que pueden incluirse el riego de campos de golf con agua regenerada, es uno de los principales obstáculos a los que se enfrentan la mayor parte de las administraciones de los estados miembros de la Unión Europea para lograr los objetivos de las directivas Marco del Agua (Voigt, et al., 2004). Para ello es necesario evaluar la vulnerabilidad a la contaminación y extremar las precauciones en las zonas vulnerables a partir de un mejor conocimiento de la infiltración y la migración de los contaminantes a través de la zona no saturada, que depende del grosor y características texturales de la zona vadosa.

La conductividad hidráulica de las formaciones volcánicas (piroclastos e ignimbritas) es un parámetro difícil de medir que presenta una amplia variabilidad, pero que puede estimarse de forma indirecta a partir de los valores de resistividad eléctrica. Sin embargo, esta correlación debe efectuarse a partir de ensayos locales y con reservas, ya que la resistividad eléctrica es también función del grado de saturación y de la conductividad eléctrica del agua del suelo. En los campos de golf, si las medidas de resistividad eléctrica se efectúan por la mañana después del riego, se puede considerar que el subsuelo tiene una humedad próxima a la capacidad de campo. En estas condiciones, los valores de resistividad eléctrica tienden asintóticamente al valor de saturación (Di Maio y Piegari, 2011), como puede verse en la Figura 5.

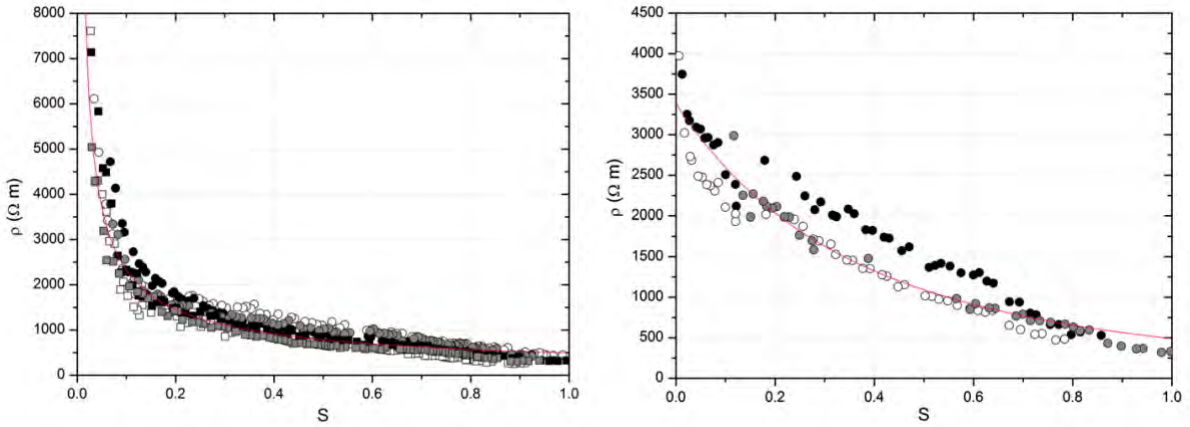


Figura 5. Correlación entre la resistividad eléctrica y el grado de saturación de distintos suelos volcánicos, desde piroclastos (izquierda) a ignimbritas (derecha), según Di Maio y Piegari (2011).

Una vez establecida la correspondiente correlación puede evaluarse la vulnerabilidad a la contaminación por el método AVI (Aquifer Vulnerability Index) desarrollado en Canadá por Van Stempvoort et al. (1992). Este método consiste en determinar la resistencia hidráulica o tiempo necesario para que los contaminantes crucen las distintas capas situadas entre la superficie del terreno y el acuífero. La resistencia hidráulica (c) se determina a partir de la suma de los cocientes entre el grosor (h) y la conductividad hidráulica vertical (k) de cada capa de la zona no saturada:

$$c = \sum_{i=1}^{n} \frac{h}{k}$$

dónde c indica el tiempo aproximado que necesita un flujo vertical por unidad de gradiente de carga para atravesar desde la superficie las diferentes capas de sedimentos situadas sobre el acuífero. Ambas variables, grosor (h) y conductividad hidráulica vertical (k) de cada capa de la zona no saturada pueden determinarse a partir de las secciones de tomografía de resistividad eléctrica. En el caso de la zona de estudio, los datos aportados en este trabajo, convenientemente cruzados con datos geológicos de la pared de la Caldera, permitirán su cálculo para ser incluidos en futuros modelos de transporte de contaminantes por la zona no saturada

CONCLUSIONES

Los resultados de esta investigación muestran que la tomografía de resistividad eléctrica es una técnica muy útil para investigar de forma rápida y no destructiva la geometría y características litológicas del subsuelo para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas existentes bajo los campos de golf, incluso en medios geológicos complejos, como en el caso del campo de Golf de Bandama situado en el borde de la caldera volcánica del mismo nombre.

Los valores de resistividad eléctrica han permitido identificar cada una de las unidades litológicas que constituyen el subsuelo del campo de golf proporcionando un modelo general que concuerda con las observaciones edafológicas efectuadas a partir de catas y del conocimiento geológico de la estructura volcánica donde se asienta el campo. El modelo obtenido proporciona información detallada sobre la variabilidad lateral y vertical de cada una de las capas y a partir de una correlación empírica entre los valores de resistividad eléctrica y permeabilidad hidráulica permite delimitar las zonas preferentes de drenaje

subterráneo que pueden significar un mayor riesgo a la vulnerabilidad del acuífero subyacente.

El método AVI es un método cuantitativo que permite determinar la vulnerabilidad en términos del tiempo de tránsito del contaminante a través de la zona no saturada que puede estimarse con buena aproximación por métodos indirectos, a partir de la información proporcionada por la tomografía de resistividad eléctrica.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado a través de los proyectos CGL2009-07025, CGL2009-12910 y C03-02SD2006-00044 del Programa CONSOLIDER. Los autores expresan también su gratitud al Club de Golf de Bandama, y en particular al “greenkeper” del campo Pelayo Guerra por facilitarnos la toma de datos experimentales. Los autores agradecen la asistencia de Annetty Benavides, Tatiana Cruz, Pilar Hernández, Vanessa Mendoza y Gema Naranjo durante la campaña de campo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cabrera, M.C.; Palacios, M.P.; Estévez, E.; Cruz, T., Hernández-Moreno, J.M. y Fernández-Vera J.R. (2009) *La reutilización de aguas regeneradas para riego de un campo de golf: evolución geoquímica y probable afección a un acuífero volcánico (Islas Canarias).* Boletín Geológico y Minero, 120(4): 543-552.

Di Maio, R. y Piegari, E. (2011) *Water storage mapping of pyroclastic covers through electrical resistivity measurements.* Journal of Applied Geophysics, 75: 196–202.

Estévez, E.; Cabrera, M.C.; Fernández, J.R; Hernández-Moreno, J.M.; Mendoza-Grimón, V.y Palacios, M.P. (2010) *25 years using reclaimed water to irrigate a golf course in Gran Canaria.* Spanish Journal of Agricultural Research, 8(S2): 95-101.

Estévez, E.; Cabrera, MC.; Molina-Díaz, A.; Robles-Molina, J. y Palacios-Díaz, MP. (2012) *Screening of emerging contaminants and priority substances (2008/105/EC) in reclaimed water for irrigation and groundwater in a volcanic aquifer (Gran Canaria, Canary Islands, Spain).* Science of The Total Environment, 433: 538-546.

Griffiths, D.H. y Barker, R.D. (1993) *Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology.* Journal of Applied Geophysics, 29: 211-226.

Hansen, A. y Moreno, C. (2008) *El Gran Volcán. La Caldera y el Pico de Bandama*. Ediciones Consejería de Medio Ambiente y Aguas del Cabildo de Gran Canaria, Gran Canaria, 310 pp.

Klute A.y Dirksen C. (1986) *Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods*. En: Methods of Soil Analysis, Part 1, 2nd ed. Klute A. Ed. Agron. Monogr. 9. ASA, CSSA and SSSA, Madison, WI. 687 pp.

Loke, M.H. (2004) RES2DINV. *Rapid 2D Resistivity and IP inversion using the least squares method* (version 3). User Manual. Geotomo Software. 133 pp.

Loke M.H. y Barker R.D. (1996) *Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method.* Geophysical Prospecting, 44: 131-152.

Van Stempvoort D., Ewert L. y Wassenaar L. (1992) *Aquifer vulnerability index. A GIS-compatible method for groundwater vulnerability mapping.* Canadian Water Resources Journal, 18(1): 25-37.

Voigt H.J., Heinkele T., Jahnke C. y Wolter R. (2004) *Characterization of groundwater vulnerability to fulfill requirements of the water framework directive of the European Union.* Geofísica Internacional, 43(4): 567-574.

ISBN: 978-84-938046-4-0

ESTIMACIÓN DE LA RECARGA MEDIANTE BALANCE DE MASA DE CLORURO ATMOSFÉRICO EN LA CALDERA DE LAS CAÑADAS, TENERIFE, ISLAS CANARIAS

Rayco MARRERO DIAZ[1,2*], Nemesio M. PÉREZ[1,2], Francisco J. ALCALÁ[3], Gladys V. MELIÁN[1,2], Eleazar PADRÓN[1,2] y Germán D. PADILLA[1,2]

[1] Instituto Tecnológico y de Energías Renovables (ITER), 38611, Granadilla de Abona, Tenerife, España. nperez@iter.es; gladys@iter.es; eleazar@iter.es; german@iter.es
[2] Instituto Volcanológico de Canarias (INVOLCAN), 38400, Puerto de la Cruz, Tenerife, España.
[3] Geo−Systems Centre (CVRM), Instituto Superior Técnico, Universidad de Lisboa, 1049-001, Lisboa, Portugal. francisco.alcala@ist.utl.pt
*Dirección actual: Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), 2610-999, Lisboa, Portugal. rayco.diaz@lneg.pt

RESUMEN

Al igual que en la mayoría de islas volcánicas oceánicas, el agua subterránea representa más del 90% de los recursos hídricos disponibles en la isla de Tenerife (Islas Canarias, España). Este trabajo presenta una estimación preliminar de la recarga anual en el año hidrológico promedio 2005-2006 en la Caldera de Las Cañadas, una cuenca endorreica situada a 2000 m s.n.m. que alberga la mayor reserva de agua dulce de Tenerife. La recarga media anual se obtuvo mediante el método de balance de masa de cloruro atmosférico (CMB) en la zona saturada, comparando la tasa de deposición total atmosférica de cloruro y la concentración media de cloruro en el agua de recarga. La potencial contribución endógena de haluros (HCl) al acuífero puede invalidar la aplicación del método del CMB. Se utilizó la relación molar cloruro/bromuro (Cl/Br) para identificar el origen atmosférico del ion cloruro en el agua de recarga. La recarga anual fue estimada en 215 $mm \cdot a^{-1}$, 44% de la precipitación. Esta cifra es un 33 % menor que la recarga media interanual obtenida por el Consejo Insular de Aguas de Tenerife mediante un modelo lluvia-escorrentía usando una serie histórica de datos de 40 años.

Palabras clave: *recarga, balance de masa de cloruro, Cl/Br, Las Cañadas, Tenerife.*

ABSTRACT

As in most volcanic oceanic islands, groundwater represents more than 90% of available water resources in Tenerife Island (Canary Island, Spain). Understanding recharge dynamics is a key for water management as a basic element for a sustainable socioeconomic development. This work presents a preliminary estimation of yearly aquifer recharge in the average hydrological year 2005-2006 in Las Cañadas Caldera, an endorheic summit area about 2000 m asl with negligible runoff, which hosts the largest freshwater reserve in Tenerife Island. The atmospheric chloride mass balance (CMB) method in the saturated zone was used to estimate yearly recharge by comparing the yearly rate of atmospheric bulk

chloride deposition and the average chloride content in recharge water. The potential endogen contribution of halides (HCl) to groundwater may invalidate the application of the CMB method. The molar chloride/bromide (Cl/Br) ratio was used to identify the atmospheric origin of chloride ion in recharge water. Yearly recharge was 215 mm·yr^{-1}, 44% of rainfall. This figure is 33% lower than the mean annual recharge obtained by the Insular Water Council of Tenerife through rainfall-runoff modelling using a 40-year data series record.

Key words: *recharge, chloride mass balance, Cl/Br, Las Cañadas, Tenerife*

INTRODUCCIÓN

En la mayoría de islas volcánicas oceánicas, los recursos hídricos superficiales son prácticamente inexistentes, siendo las aguas subterráneas las que soportan la mayor parte del suministro para diferentes usos. En Tenerife (Islas Canarias, España), al igual que en el resto de las islas occidentales del Archipiélago Canario, el agua subterránea representa casi la totalidad de los recursos hídricos que se consumen (PHTF, 1996). Datos del año 2004, indican una cifra en torno a 226 hm^3 anuales. Una buena cuantificación y conocimiento de la dinámica de la recarga de acuíferos es fundamental para la gestión de los recursos hídricos subterráneos, como elemento básico para un desarrollo socio-económico sostenible en estas regiones insulares.

Este trabajo presenta una estimación preliminar de la recarga anual en la Caldera de Las Cañadas (CLC) durante el año hidrológico promedio 2005-2006 mediante el método de balance de masa de cloruro atmosférico (*Chloride Mass Balance*, CMB). La CLC es la principal área de recarga del acuífero de Las Cañadas, considerado la mayor reserva de agua dulce de Tenerife (PHTF, 1996).

La aplicación del método del CMB en la zona saturada permite estimar la recarga media neta que alcanza el nivel freático (Eriksson y Khunakasem, 1969; Custodio, 2010). La precisión del método es elevada en condiciones controladas, como ha quedado demostrado en estudios de otros terrenos volcánicos insulares (e.g. Herrera, 2001; Muñoz, 2005; Alcalá, 2006; Custodio, 2010). El método del CMB se basa en el comportamiento de trazador casi ideal y conservativo del ion cloruro a través del suelo a partir de la deposición total atmosférica. El método se basa en la comparación del aporte total de cloruro atmosférico, incluyendo la fracción asociada a la precipitación y la contribuida por el polvo atmosférico, con el contenido medio de cloruro que percola a través de la zona no saturada hacia el nivel freático del acuífero (Custodio, 1997).

ÁREA DE ESTUDIO Y METODOLOGIA

El acuífero de Las Cañadas (216 km^2) comprende la CLC, el complejo volcánico Teide-Pico Viejo (CTPV) y el Valle de Icod-La Guancha (VIG) (Figura 1). La diferencia de altitud desde la costa hasta el pico del volcán Teide (3718 m.s.n.m.) imprime contrastes climáticos muy notables. Mientras en el VIG el clima está condicionado por vientos húmedos del noreste o alisios con una precipitación media anual que oscila entre los 300 mm en la costa y los 700 mm en la zona de medianías y una temperatura media anual entre 15 ºC y 20 ºC, el clima en la CLC es extraordinariamente seco la mayor parte del año. La precipitación anual media en la CLC oscila entre 500 mm en las zonas de barlovento y menos de 300 mm en el interior (Figura 1).

Desde el punto de vista geomorfológico, la CLC representa una cuenca endorreica situada a más de 2000 m s.n.m. en la parte más elevada de la isla de Tenerife. En la CLC el

suelo edáfico es casi inexistente y existe una elevada porosidad y permeabilidad por fracturación y/o fisuración de los materiales jóvenes del CTPV que recubren la superficie (Figura 1). Estos factores, unidos a la existencia de una topografía casi plana y la ausencia de niveles impermeables someros, favorecen la rápida infiltración de la lluvia y reducen la escorrentía superficial a valores mínimos durante los eventos extremos de precipitación. Estas condiciones en superficie contrastan con la baja permeabilidad del núcleo de alteración hidrotermal existente bajo el CTPV y del basamento de la CLC (Marrero, 2010). La existencia de estos materiales junto con la densa red de diques puede actuar como una barrera al flujo subterráneo, favoreciendo la retención de grandes reservas de agua subterránea meteórica en el interior de la CLC (PHTF, 1996; Marrero, 2010).

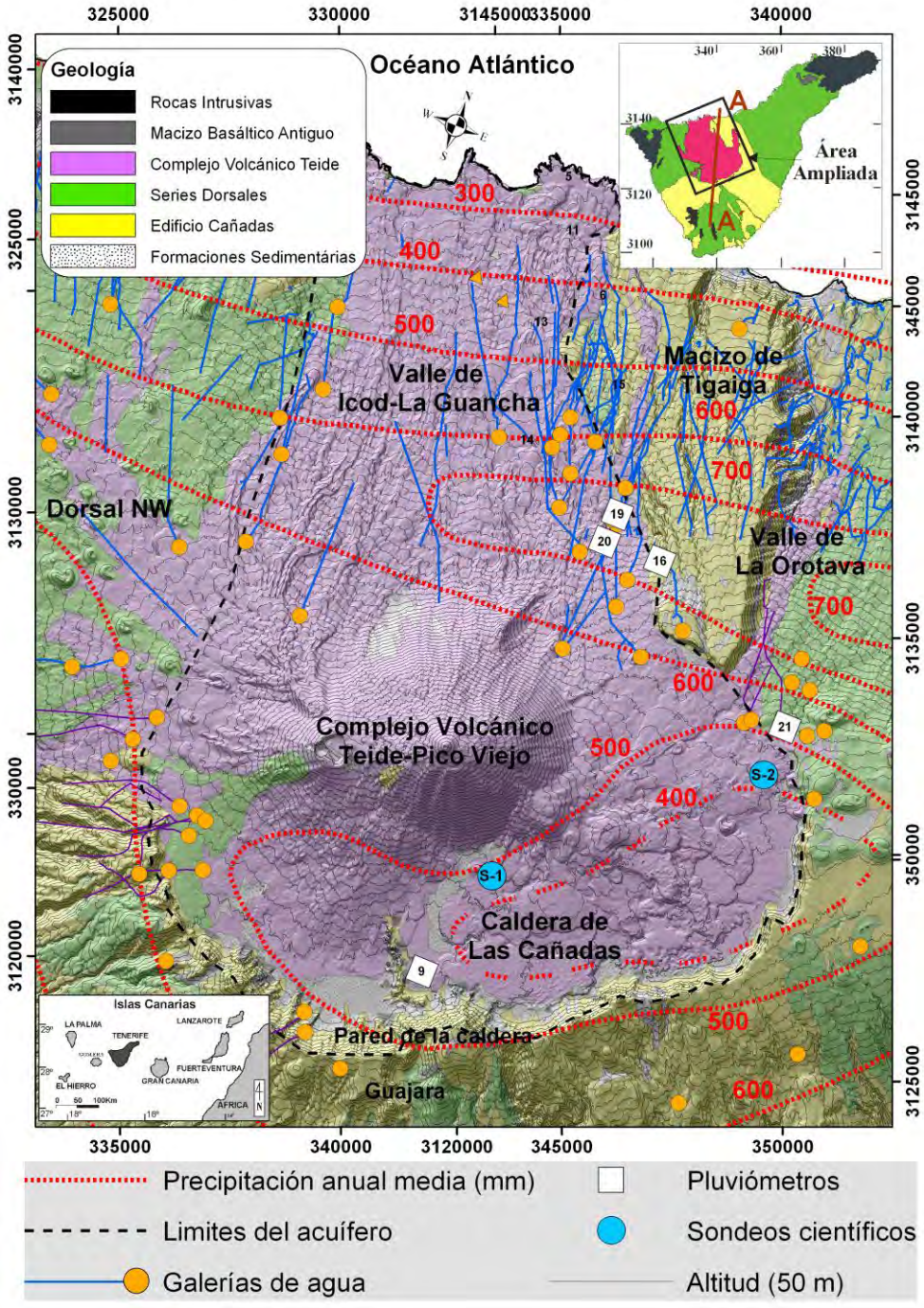


Figura 1. Mapa geológico del acuífero de Las Cañadas. Datos de precipitación anual media obtenidos por el Consejo Insular de Aguas de Tenerife (CIATFE) (PHTF, 1996).

Al igual que en otros acuíferos volcánicos insulares montañosos, la aplicación del método del CMB en la CLC ha considerado: (1) la posibilidad de mezcla de la recarga producida a diferente altitud, lo que requiere formulación adicional para evaluar la recarga (Custodio, 2010); (2) la identificación de fuentes adicionales de cloruro no atmosférico que contribuyen al agua subterránea, como por ejemplo la potencial contribución de haluros endógenos (HCl) al acuífero o ciertas fuentes de origen antrópico (Alcalá y Custodio, 2008a); (3) la definición del balance de escorrentía superficial entrante y saliente, despreciable en este caso de estudio; (4) la posible retención temporal de cloruro en la zona no saturada entre eventos sucesivos de percolación (Alcalá y Custodio, 2014). En condiciones estacionarias, para un periodo de tiempo suficientemente prolongado como un año hidrológico, y para una retención temporal de cloruro despreciable en la zona no saturada inducida por una rápida percolación de los eventos de recarga, el balance de masa de cloruro atmosférico se puede expresar como (Custodio, 2010, Alcalá y Custodio, 2014):

$$P \cdot C_P = R \cdot C_R + F \tag{1}$$

donde P y R son precipitación y recarga, respectivamente; C_P y C_R son la concentración media de cloruro en la deposición total atmosférica y en el agua de recarga, respectivamente. La tasa de deposición total atmosférica se puede expresar como $A=P \cdot C_P$, incluyendo la deposición húmeda de cloruro asociada a la precipitación y de deposición seca de cloruro asociada al polvo atmosférico y a aerosoles (Alcalá y Custodio, 2008b); F representa otros aportes de cloruro, como por ejemplo la asociada a la contribución de haluros de origen volcánico. Para un balance anual, P y R se expresan en $mm \cdot a^{-1}$, C_P y C_R en $g \cdot m^{-3}$ o en $mg \cdot L^{-1}$, y A y F en $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$.

La tasa anual de deposición total de cloruro atmosférico (A) fue calculada mediante la sumatoria de los valores parciales de A obtenidos en muestreos mensuales sucesivos de la precipitación (P) y de la concentración media de cloruro (C_P) en la deposición total atmosférica (húmeda + seca) realizados durante el año hidrológico 2005-2006 en 5 pluviómetros abiertos instalados entre 1.316 y 2.149 m s.n.m. en el acuífero de Las Cañadas (Figura1; Tabla 1). En el año hidrológico 2005-2006 se registraron en la CLC precipitaciones ligeramente superiores a la media (Marrero, 2010). Durante este año no se constató ningún evento significativo de escorrentía.

Para determinar el contenido medio de cloruro (C_R) en el agua de recarga, se utilizaron análisis de aguas subterráneas muestreadas en la parte superior de la zona saturada de los sondeos científicos S-1 y S-2, localizados en el interior de la CLC (Figura 1), de 505 y 404 m de profundidad, respectivamente.

RESULTADOS

Los valores medios obtenidos de C_R en los sondeos S-1 y S-2 fueron de 30.0 y 16.4 $mg \cdot L^{-1}$, respectivamente. En las zonas más altas de Tenerife C_R varía entre 4 y 20 $mg \cdot L^{-1}$ (Alcalá y Custodio, 2008a; Marrero, 2010). Estas muestras representan la recarga neta, que incluye fracciones desconocidas de recarga difusa y directa, que alcanza con diferente temporalidad la zona saturada. El espesor de la zona no saturada oscila entre 350 y 450 m (Farrujia et al., 2006; Marrero, 2010). El tiempo medio de tránsito de percolación de la recarga por la zona no saturada es aproximadamente 2 meses, y depende del estado de semi-saturación y de la distribución e intensidad de los eventos de precipitación (Farrujia et al., 2006). Existe correspondencia entre eventos de precipitación y respuesta del nivel freático; por tanto, C_R corresponde a una recarga poco diferida y poco amortiguada.

Se determinó el contenido en C_P y C_R de las muestras de deposición total atmosférica y de agua de recarga en el Laboratorio del Instituto Tecnológico y de Energías Renovables (ITER) de Tenerife mediante un cromatógrafo líquido (aniónico) de alta resolución DIONEX DX-500®; la precisión fue de ~1% de la desviación estándar. Las muestras fueron filtradas sin acidificar antes de ser analizadas.

Tabla 1. Deposición anual de cloruro atmosférico (*A*) en los 5 pluviómetros instalados en la CLC (Figura 1). *Δt*: número de días con un registro continuo de la precipitación (*P*).

Pluviómetro	Latitud UTM (m)	Longitud UTM (m)	Altitud (m s.n.m.)	*Δt* (días)	*P* (mm)	*A* (g m^{-2} a^{-1})
19	340666	3135283	1316	333	552.8	3.56
20	340628	3134547	1475	377	676.8	2.28
16	342064	3134615	1711	338	590.0	3.51
21	346405	3132013	2059	317	680.7	3.79
9	340412	3123177	2149	306	729.2	4.38

Se utilizó la relación molar Cl/Br, *r*, para identificar una posible contribución de haluros endógenos al agua de recarga en la CLC. En las muestras de deposición total recogidas, *r* disminuye con la altitud desde valores algo superiores a 500 en las zonas bajas del acuífero hasta valores en torno a 400 en las cumbres. Estos valores coinciden con los obtenidos por Alcalá y Custodio (2008a) en Tenerife y en la vecina isla de Gran Canaria. En las aguas de recarga a elevada altitud, *r* es 484±93.

La contribución de haluros al agua subterránea tiende a aumentar *r* hasta valores por encima de 1000 (Alcalá y Custodio, 2008a). Los valores de C_R y *r* en el sondeo S-2 son muy similares a los medidos en las muestras de deposición (Figura 2), pudiendo asumir que (1) la principal zona de recarga de ese sondeo se produce en la zona de la CLC a esa altitud, y (2) el origen del cloruro para C_P y C_R es principalmente atmosférico. No se dispone de datos de *r* para el sondeo S-1. Sin embargo, y a pesar de ser aguas muestreadas en la parte más somera de la zona saturada, el mayor contenido en cloruro (Figura 3) apunta a pensar que pueda existir una cierta contribución de haluros endógenos al acuífero. Valentin et al. (1990) sugieren que existe una pequeña contribución de HCl al agua subterránea en esa zona. Los valores de C_R del sondeo S-1 han sido descartados para estimar la recarga mediante el método de CMB.

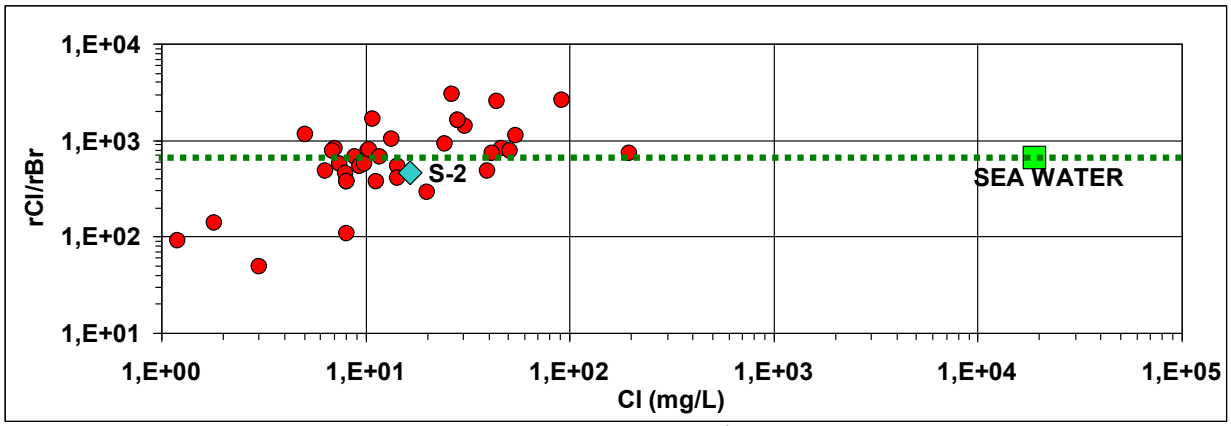


Figura 2. Relación molar *r*=Cl/Br (adimensional) vs. Cl (mg·L^{-1}) en el agua subterránea del sondeo S-2 (rombo azul) y en las muestras de deposición total tomadas en la CLC (círculos rojos). El valores de *r* y de contenido en Cl del agua de mar (línea y cuadrado verde) fueron tomados de Alcalá y Custodio (2008a).

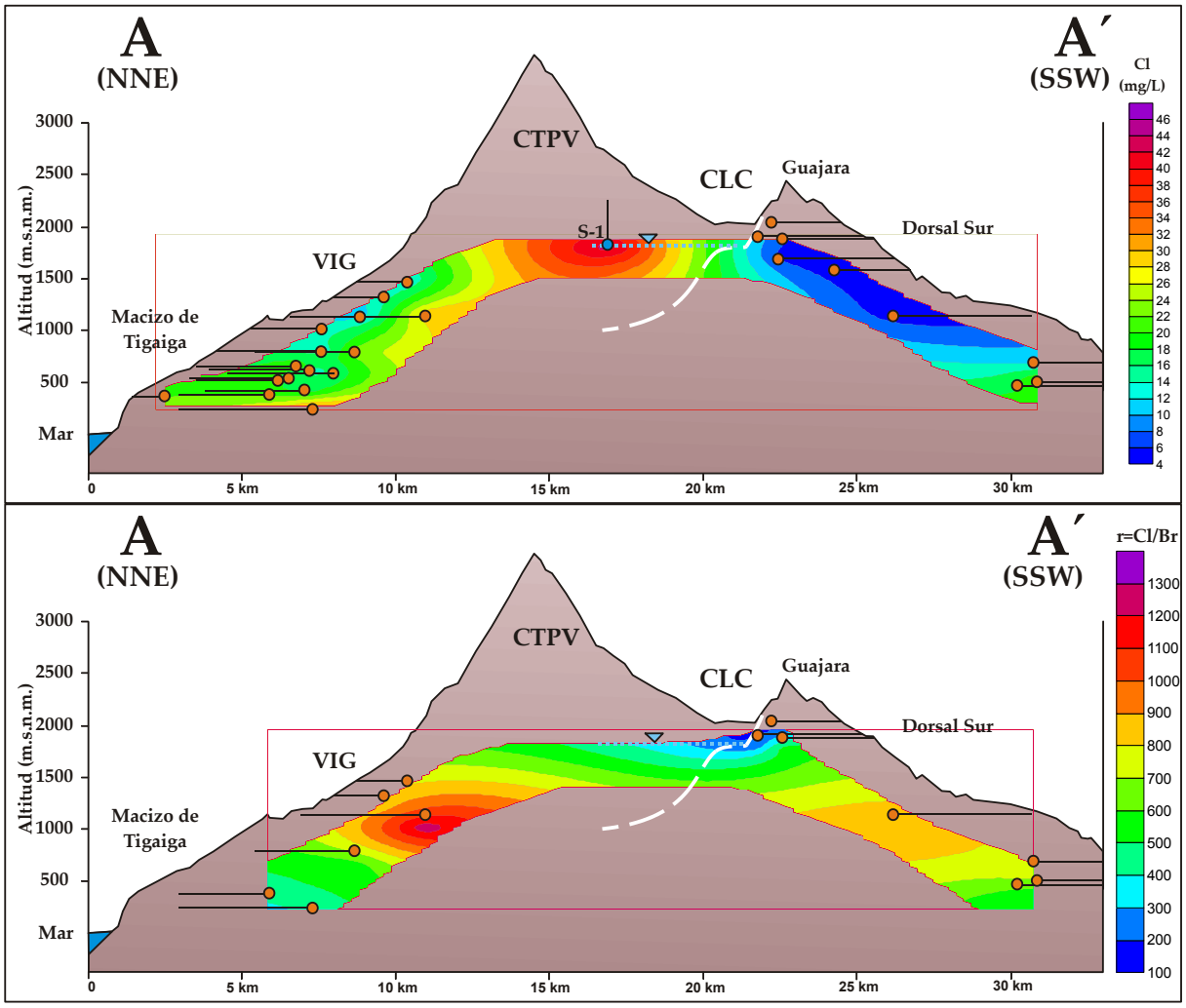


Figura 3. Sección esquemática de la isla de Tenerife (perfil NNE-SSW, ver Figura 1 para localización) mostrando la distribución espacial del contenido en cloruro (arriba) y de la relación molar cloruro/bromuro (r=Cl/Br) (abajo) en el agua subterránea. Los sectores centro y norte muestran contenidos en cloruros y valores de *r* más elevados que en el sector sur. La contribución endógena de cloruro como HCl emitido por el sistema volcánico-hidrotermal asociado al CTPV induce los mayores contenidos en cloruros y de *r* observados en el agua subterránea más profunda. Líneas blancas y azules: límite superior del basamento y posición cualitativa del nivel freático, respectivamente, inferido por Marrero (2010).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La CLC es una cuenca endorreica de montaña con una elevada capacidad de infiltración y escorrentía prácticamente despreciable, que representa una zona preferencial de recarga y presumiblemente alberga la mayor reserva de agua subterránea dulce de Tenerife. La precipitación media anual en la CLC es de 489 $mm \cdot a^{-1}$, según los datos obtenidos por el CIATFE a partir de una serie histórica de 60 años (periodo 1944-2004) (Farrujia et al., 2006). La tasa de deposición total de cloruro atmosférico (*A*) en la CLC obtenida en el año hidrológico 2005-2006 varía entre 2.28 y 4.38 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$, con un valor medio ponderado de 3.52 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$. Usando este valor de *A* y la concentración en cloruro del agua de recarga (C_R) del sondeo S-2, el cual no ha mostrado signos evidentes de una contribución relevante de cloruro de origen endógeno, se obtiene una recarga anual (*R*) de 215 $mm \cdot a^{-1}$, que representa un 44% de la precipitación anual. Ésta cifra es un 33 % menor que la recarga media interanual de 334 $mm \cdot a^{-1}$ estimada por el CIATFE mediante un modelo de lluvia-

escorrentía usando una serie histórica de datos de 60 años (periodo 1944-2004) (Farrujia et al., 2006).

La diferencia entre la magnitud de la recarga potencial obtenida mediante métodos de balance de agua en superficie y en el suelo respecto de la magnitud de la recarga neta obtenida mediante métodos de balance de agua en la zona saturada ha sido similar en otros dominios geográficos (Contreras et al., 2008; Andreu et al., 2011; Espinosa, 2014), independientemente del método utilizado. La diferencia suele tener varias causas: (1) el diferente significado hidrológico de la recarga potencial, la cual puede transferirse parcialmente fuera del sistema antes de llegar al nivel freático (Alcalá y Custodio, 2014); (2) la deficiente definición de la tasa de evapotraspiración real que puede haberse realizado con el modelo hidrológico de CIATFE a partir de datos poco precisos del comportamiento hidrodinámico del suelo y de la vegetación; (3) la limitada serie temporal de *A* no ha cubierto temporalmente pequeñas fracciones de recarga difusa con tiempo de tránsito superior a un año; (4) la representatividad de C_R no sea totalmente fiable debido a cierta contribución mínima de cloruro no atmosférico que haya pasado inadvertido durante la selección de muestras. En cualquier caso, estas condiciones son comunes a la combinación de ambos métodos y se pueden corregir parcialmente con series temporales más largas de las variables del CMB.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación presenta resultados de la tesis doctoral de la primera autor, realizada gracias al soporte técnico y económico prestado por el ITER y el Cabildo Insular de Tenerife, entre otros organismos. El primer autor también agradece a la FCT de Portugal la beca postdoctoral SFRH/BPD776404/2011.

REFERENCIAS

Alcalá, F. (2006). *Recarga a los acuíferos españoles mediante balance hidrogeoquímico*. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 346 pp. + 405 pp. de anexos.

Alcalá, F. y Custodio, E. (2008a). *Using the Cl/Br ratio as a tracer to identify the origin of salinity in aquifers in Spain and Portugal*. Journal of Hydrology 359: 189-207.

Alcalá, F. y Custodio, E. (2008b). *Atmospheric chloride deposition in continental Spain*. Hydrological Processes 22: 3636-3650.

Alcalá, F. y Custodio, E. (2014). *Spatial average aquifer recharge through atmospheric chloride mass balance and its uncertainty in continental Spain*. Hydrological Processes 28: 218-236.

Andreu, J.M., Alcalá, F.J., Vallejos, Á., Pulido-Bosch, A. (2011). *Recharge to aquifers in SE Spain: different approaches and new challenges*. Journal of Arid Environments 75: 1262-1270.

Contreras, S., Boer, M., Alcalá, F.J., Domingo, F., García, M., Pulido-Bosch, A., Puigdefábregas, J. (2008). *An ecohydrological modelling approach for assessing long-term recharge rates in semiarid karstic landscapes*. Journal of Hydrology 351: 42-57.

Custodio, E. (1997). *Evaluación de la recarga por la lluvia mediante métodos ambientales químicos, isotópicos y térmicos*. En: La Evaluación de la Recarga a los Acuíferos en la Planificación Hidrológica. (Eds.: Custodio, E., Llamas, M. R. y Samper, J.). IGME y AIH. Las Palmas de Gran Canaria- Madrid. 83-110.

Custodio, E. (2010). *Estimation of aquifer recharge by means of atmospheric chloride deposition*

balance in the soil. Contributions to Science 6: 81-97.

Eriksson, E. y Khunakasem, V. (1969). *Chloride concentrations in groundwater recharge rate and rate of deposition of chloride in the Israel coastal plain*. Journal of Hydrology 7(2): 178-197.

Espinosa, S. (2014). *Estimación de la recarga media a anual de acuíferos. Aplicación al Baix Ebre*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.

Farrujia, I., Braojos, J.J., y Fernández, J.D. (2006). *Evolución cuantitativa del sistema acuífero de Tenerife*. Conferencia en "Las aguas subterráneas en la Directiva Marco de Aguas", Santa Cruz de Tenerife.

Herrera, C. (2001). *Caracterización hidrogeoquímica del Macizo de Betancuria, Fuerteventura, Archipiélago de Canarias*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 225 pp.

Marrero, R. (2010). *Modelo hidrogeoquímico del acuífero de Las Cañadas del Teide (Tenerife, Islas Canarias).* Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 500 pp + 110 pp. de anexos.

Muñoz, J.S. (2005). *Caracterización hidrogeológica del acuífero de la Aldea (Gran Canaria).* Tesis Doctoral. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. 310 pp.

Plan Hidrológico Insular de Tenerife (PHTF) (1996). Decreto 319/1996, de 23 de diciembre, Boletín Oficial de Canarias.

Valentin, A.; Albert-Beltrán, J.F. y Diez, J.L. (1990). *Geochemical and geothermal constraints on magma bodies associated with historic activity, Tenerife (Canary Islands)*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 44: 251-264.

ISBN: 978-84-938046-4-0

MODELO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL SECTOR DEL ROQUE DE LOS MUCHACHOS (ACUÍFERO INSULAR DE LAS VERTIENTES) EN LA ISLA DE LA PALMA, CANARIAS

Sergio MARTOS ROSILLO[1], Raquel MORALES GARCÍA[1], Alfredo GARCÍA DE DOMINGO[1], Loreto FERNÁNDEZ RUÍZ[1] y Juan José DURÁN VALSERO[1]

[1] Instituto Geológico y Minero de España. C/Ríos Rosas, 23. 28003. Madrid. España. s.martos@igme.es; r.morales@igme.es; a.garcia@igme.es; ml.fernandez@igme.es; jj.duran@igme.es

RESUMEN

El Instituto Geológico y Minero de España ha realizado recientemente un estudio hidrogeológico para analizar la posible incidencia del vertido de aguas residuales depuradas procedentes del observatorio astrofísico ubicado en el Roque de los Muchachos (La Palma, Canarias). Ello ha requerido el establecimiento de un modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico del Acuífero Insular de Las Vertientes, en este sector. Para establecer el modelo se han recopilado y tratado datos meteorológicos, foronómicos, e hidrogeoquímicos. Asimismo, se ha realizado una cartografía geológica de detalle, se han evaluado los parámetros hidráulicos de las formaciones volcánicas que afloran en el sector y se han determinado las características hidrogeoquímicas e isotópicas de los puntos de agua más próximos. En este trabajo se presentan y se discuten los resultados de esta investigación hidrogeológica y se hacen diferentes propuestas para avanzar en el conocimiento hidrogeológico de este importante acuífero.

Palabras clave: *hidrogeología, basaltos, La Palma (Canarias)*

ABSTRACT

The Geological Survey of Spain has recently conducted a hydrogeological study to analyze the potential impact of a treated sewage discharge from the astrophysical observatory located at El Roque de los Muchachos (La Palmas, Canary Islands). This study has required to stablish a conceptual model of Las Vertientes aquifer. To establish this model, hydrogeological, hidrochemical and isotopic data have been collected and analyzed. Also he has been a geological mapping in detail, the hydraulic parameters of the formations of volcanic outcrops and identified the hydrogeochemical and isotopic characteristics of groundwater have been evaluated. In this work are presented and discussed the results of the hydrogeological research and different proposals are made to advance in the hydrogeological knowledge of this important aquifer.

Key words: *hydrogeology, basalts, La Palma (Canary Islands)*

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presenta una contribución a la mejora del conocimiento hidrogeológico del Acuífero Insular de Las Vertienes (en adelante AIV), en el entorno de la zona del Roque de los Muchachos, en la isla de La Palma (Islas Canarias) (Figura 1). Los resultados que se presentan derivan de la caracterización hidrogeológica realizada por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) para el análisis de la posible incidencia que sobre las aguas subterráneas pudieran tener los vertidos de aguas residuales depuradas, que se realizan en las instalaciones del Instituto Astrofísico de Canarias (IAC), en la cúspide de la isla. Para alcanzar este objetivo se ha realizado una revisión y análisis de la información geológica e hidrogeológica disponible, a la que se han añadido nuevos datos relativos a los parámetros hidráulicos del acuífero y de la composición hidrogeoquímica e isotópica de las aguas subterráneas drenadas por las galerías subterráneas más próximas.

MARCO HIDROGEOLÓGICO

El entorno investigado está situado en la parte noreste de la isla de La Palma, sobre el Acuífero Insular Vertientes (AIV), en la zona más alta de la isla, con cotas comprendidas entre 2.000 y los 2.426 m s.n.m., del Roque de los Muchachos (Figura 1). El AIV constituye el principal acuífero de la isla (DGA, 2005). Dispone de 318 km^2 de superficie y se extiende por toda la zona de cumbres septentrional, desde el cono norte hasta la mitad sur de la isla, mientras que el resto de su perímetro lo define la cota 600 m s.n.m. (CIAP, 2013). Lo forman i) lavas, piroclastos basálticos, diques y aglomerados del Edificio Volcánico de Garafía, ii) aglomerados y coladas basálticas del tramo Inferior del Edificio de Taburiente y iii) lavas basálticas, conos y depósitos piroclásticos basálticos del tramo Superior del Edificio de Taburiente. Su espesor puede llegar a superar los 1.000 m. El muro del acuífero, que aflora en la Caldera de Taburiente, lo define el Complejo Basal, formado fundamentalmente por materiales de muy baja permeabilidad del denominado Edificio Submarino (IGME, 2008). La práctica totalidad de los puntos de agua que existen sobre el AIV consisten en galerías y manantiales. Hay inventariadas más de 157 galerías. Las 58 más importantes presentan caudales medios de 20 a 40 l/s y comprendidos entre 2 y 96 l/s (CIA, 2013). La da difusividad hidráulica está comprendida entre 50 y 6000 m^2/día (Poncela y Skupien, 2011). En este sentido, en el sector del Roque de los Muchachos, la difusividad hidráulica resulta comprendida entre 50 y 100 m^2/día. La superficie piezométrica del AIV presenta una disposición radial divergente, desde su interior, en el límite con la Caldera de Taburiente, hacia el mar. Destaca la notable altitud que alcanza la superficie piezométrica en el sector central del acuífero, donde se dibujan isopiezas de hasta 1750 m s.n.m (SPA-15, 1975), coincidiendo con la zona del Roque de los Muchachos. En este sentido, Custodio (1985) indica que este abombamiento de la superficie piezométrica está relacionado con el levantamiento de los materiales de baja permeabilidad que constituyen el Complejo Basal en el sector central de la isla. Además, a este efecto se debe sumar el apantallamiento del flujo que supone la abundante presencia de diques subverticales de baja permeabilidad. Estos se disponen a modo de enjambre de celdas, y son más abundantes en el sector central del acuífero. Según el Plan Hidrológico Insular de La Palma, de 2001, la recarga media del acuífero es de 112 hm^3/año, mientras que las salidas por extracciones y manantiales suman 30 hm^3/año. Los valores de conductividad eléctrica del agua (CE) están comprendidos entre 80 y 577 µS/cm y el pH entre 7 y 8,5. Son aguas bicarbonatado cálcicas y/o magnésicas y bicarbonatado sódicas (CIAP, 2013). Los resultados de los análisis de oxígeno-18 y deuterio han permitido definir la recta meteórica local, con pendiente clásica 8 y con exceso de deuterio de +19 (CIAP, 2006; Skupien y Poncela, 2007). Estos resultados coinciden con los de otros trabajos previos (Vegeer, 1991, Poncela y Skupien, 2008) con los que se ha estimado la recta altitudinal local según la expresión: Altura (m) = $-416\ \delta\ ^{18}O - 755$.

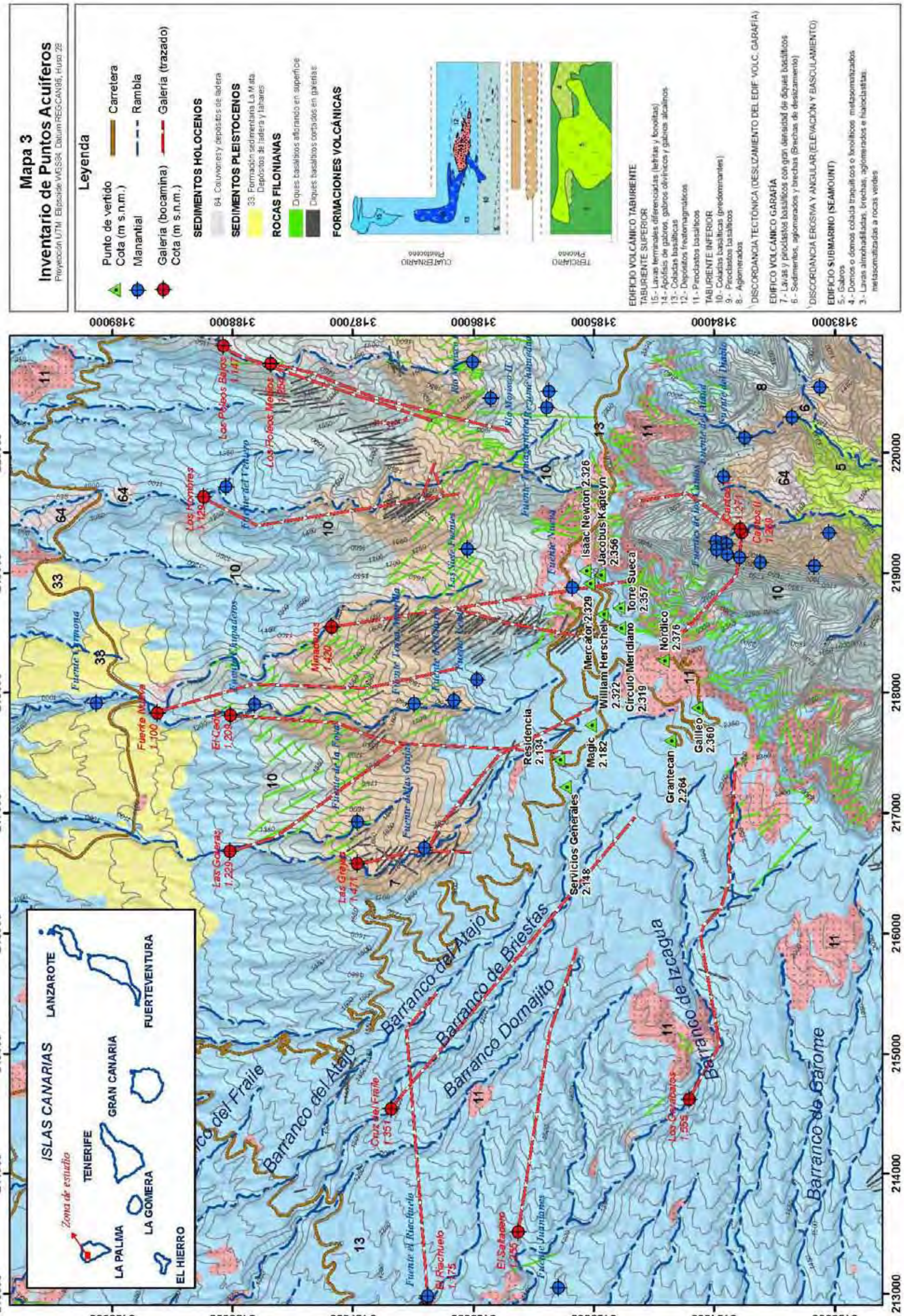


Figura 1. Mapa hidrogeológico del área investigada.

METODOLOGÍA

Se ha realizado un reconocimiento geológico a escala 1/10.000 del área de estudio así como la revisión y actualización del inventario de puntos de agua. Así mismo, se han determinado los valores de porosidad y permeabilidad de cuatro muestras, tres correspondientes a basaltos y una a piroclastos. Estas determinaciones fueron realizadas en la Universidad Politécnica de Madrid. La porosidad efectiva se determinó mediante picnometría de Helio, mientras que para medir la permeabilidad se utilizó un permeámetro de gas (nitrógeno), al que se aplicó la corrección de Klinkerberg.

Además, se tomaron siete muestras de agua, en diferentes galerías activas en la zona de estudio. Coincidiendo con el muestreo se midieron, in situ, la CE, la temperatura y el pH del agua, mediante un conductivímetro y pHmetro Hach HQ40d, equipado con una sonda integrada de temperatura. Al día siguiente de su toma, las muestras fueron enviadas a los diferentes laboratorios, debidamente refrigeradas. Los elementos mayoritarios, metales y la oxidabilidad se determinaron en el laboratorio del IGME, en Madrid. Oxígeno-18 y Deuterio, en la Universidad de Málaga. La CE (20ºC) y el pH, por electrometría; K, Na, por espectrometría de emisión atómica; HCO_3, CO_3, por volumetría, y finalmente, Ca, Mg, PO_4, NH_4, SiO_2, Cl, SO_4, por espectrofotometría de absorción.

RESULTADOS

Caracterización geológica

La zona estudiada (Figura 1) está constituida por sucesivos eventos de depósitos volcánicos que han organizado el edifico volcánico insular y que han sido erosionados y destruidos por distintos procesos geomorfológicos a lo largo de su historia geológica (IGME, 2008). Los materiales que afloran mayoritariamente en el sector investigado son coladas y, en menor medida, piroclastos basálticos. Entre estos, y por su relevancia en el funcionamiento hidrogeológico local, deben ser destacados varios niveles de arcillas que pueden llegar a superar algún metro de espesor. Aparecen intercalados en la base y entre el conjunto de piroclastos del edificio Taburiente superior y su presencia da lugar a algunos manantiales colgados, como el de Fuente Nueva. Por otro lado, se destacan los citados depósitos de alteración que afloran en el replano formado entre la caldera de Taburiente y los barrancos que descienden hacia la costa. Consisten en bloques y cantos de distinta naturaleza, de tamaño muy variable y prácticamente sin matriz, relacionados con procesos de gelifracción. Este depósito constituye un tapiz permeable de gran extensión superficial y espesor muy variable.

Datos hidrodinámicos

Se dispone de un mapa de isopiezas de 1975, en el que se indica que bajo la zona del Roque de los Muchachos se sitúa la isopieza de 1.750 m s.n.m (SPA, 1975). Por tanto, bajo las instalaciones del IAC, hay una zona no saturada con un espesor comprendido entre 384 y 662 m. En la Figura 2, elaborada con los datos foronómicos proporcionados por el Consejo Insular de Aguas de La Palma, se presentan los hidrogramas de las galerías más próximas al área estudiada frente a la precipitación mensual. La serie pluviométrica se ha generado con los valores medios de las estaciones de Roque, Lomo Cebolla y Marcos y Cordero, completada en los periodos de falta de datos con los de la estación controlada por del ICA, en el Roque de los Muchachos. Los hidrogramas de las galerías Poleos Medio y Bajo, Fuente Nueva y Minaderos son prácticamente planos, típicos de sistemas muy inerciales. Con todo, en la Figura 2 se observan dos crecidas de caudal, relativamente significativas, en la galería de Las Goteras. Las precipitaciones que explicarían estos aumentos de caudal

corresponden prácticamente a un año antes del incremento de caudal. Por otro lado, en la Tabla 1, se presentan los valores de porosidad y permeabilidad determinados, donde destacan las reducidas permeabilidades de la matriz de la roca; propias de los medios de baja permeabilidad (10^{-9} m/s).

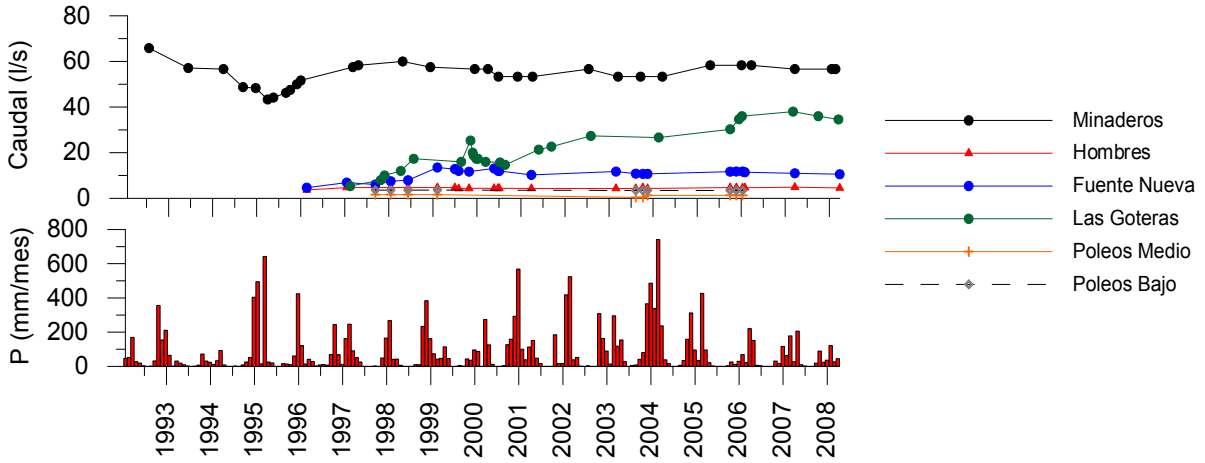


Figura 2. Hidrograma de caudales drenados por las galerías de la zona de estudio.

Tabla 1. Porosidad total, densidad y permeabilidad de diferentes muestras de basaltos y piroclastos tomadas en afloramientos del entorno del Roque de los Muchachos.

ID Muestra	X_UTM	Y_UTM	Porosidad (%)	K_{agua} (m/s)
1.Basalto. Circulo Meridiano	218508	3184821	8,7	$1{,}35423E^{-08}$
2.Piroclasto sector NOT	218286	3184405	41,2	$3{,}78933E^{-07}$
3.Basalto Gran Te Can	217640	3184360	11,5	$1{,}93019E^{-08}$
4.Basalto sector Residencia	217233	3185255	10,5	$5{,}808E^{-11}$

Características hidrogeoquímicas e isotópicas

En la Tabla 2 se comprueba que las aguas analizadas están poco mineralizadas (su CE está comprendida entre 73 y 104 µS/cm), con un pH medio, máximo y mínimo de 8, 7,8 y 8,4, respectivamente. Destacan las reducidas concentraciones de nitratos, con una media de 1,9 mg/l, y la ausencia de nitritos y amonio. Las concentraciones de PO_4 están comprendidas entre 0,13 y 0,69 mg/l. Estas concentraciones se asocian a la disolución de apatito, mineral frecuente en las rocas volcánicas. Se trata de aguas de facies bicarbonatado sódicas (Figura 3), con una mineralización similar y un evidente exceso de sodio respecto al cloruro, que ya ha sido citado por Poncela y Skupien (2011). Los valores de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ están comprendidos entre -6,72‰ y -6,05‰ en el caso del $\delta^{18}O$ y entre -36,10‰ y -30,91‰ en del $\delta^{2}H$. En la Figura 3 se han representado las desviaciones isotópicas de las aguas subterráneas en relación con la recta meteórica mundial y con la recta meteórica local. Las muestras de agua subterránea se encuentran lejos de la composición isotópica del mar, y se alinean perfectamente con la línea meteórica local. Se trata, por tanto, de aguas procedentes de la infiltración del agua de lluvia local, poco evolucionadas y con cierto empobrecimiento en isótopos pesados. Aspectos, que son coherentes con las características geológicas y fisiográficas del área investigada. En efecto, las galerías quedan excavadas bajo una potente zona no saturada, que se recarga a una altitud considerable, donde la lluvia se empobrece en isótopos pesados conforme aumenta la altitud de la precipitación, por el efecto orográfico. La aplicación de la recta altitudinal local, descrita con anterioridad (Vegeer, 1991, Poncela y Skupien, 2008) ha permitido comprobar que las cotas de recarga media de las galerías estudiadas quedarían comprendidas entre 1762 m (Los Hombres) y 2040 (El Cedro). En lo que se refiere a la

calidad del agua para abastecimiento, se comprueba que todos los elementos analizados presentan concentraciones admisibles para consumo humano según el RD 140/2003.

Tabla 2. Resultados analíticos de los elementos mayoritarios, CE, pH, amonio, nitritos y fosfatos, $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ correspondientes a las muestras tomadas en distintas galerías del Acuífero de Las Vertientes.

Muestra	Cedro	Fuente Nueva	Goteras	Hombres	Minaderos	Poleos Bajos	Poleos Medios
Cl (mg/l)	1	5	2	5	1	3	3
SO_4 (mg/l)	7	7	7	5	7	5	7
HCO_3 (mg/l)	39	38	49	50	38	50	46
CO_3 (mg/l)	0	0	2,41	0	0	0	0
NO_3 (mg/l)	4	3	4	0	2	0	0
Na (mg/l)	14	14	18	11	12	10	12
Mg (mg/l)	2	3	2	3	2	3	2
Ca (mg/l)	1	1	1	5	2	5	3
K (mg/l)	4	4	4	4	3	5	5
pH	7,81	8,12	8,4	7,75	7,81	7,93	8,02
C.E. µS/cm	79	81	104	96	73	95	87
SiO_2 (mg/l)	24,4	29,2	25	23	25,7	24,2	22,7
NO_2 (mg/l)	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
NH_4 (mg/l)	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
$\delta^{18}O$ ‰	-6,72	-6,64	-6,71	-6,05	-6,42	-6,30	-6,27
$\delta^{2}H$ ‰	-35,30	-34,76	-36,10	-30,91	-32,98	-32,09	-31,76
Fosfatos (mg/l)	0,27	0,28	0,69	0,13	0,41	0,21	0,21

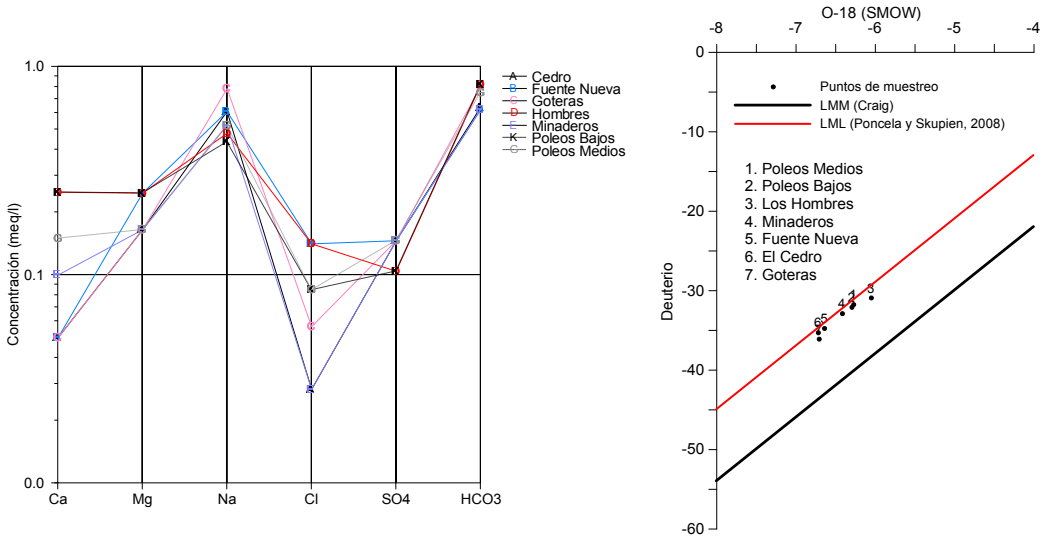


Figura 3. Diagrama de Schoeller-Bekaloff modificado (izquierda) y valores de $\delta^{2}H$ frente al $\delta^{18}O$ de las aguas captadas en diferentes galerías (derecha).

MODELO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO

La interpretación conjunta de toda la información geológica, hidrogeológica, hidrogeoquímica e isotópica, tanto la recopilada como la generada, permite establecer un modelo conceptual coherente de funcionamiento hidrogeológico en la zona (Figura 4). La disposición geológica de los materiales que conforman el acuífero consiste en un potente apilamiento sucesivo de coladas de los edificios volcánicos de Taburiente superior, inferior y Garafía que se disponen suavemente inclinados hacia la costa. La presencia de intercalaciones arcillosas impermeables en el edificio volcánico de Taburiente, dificulta la rápida percolación de la recarga, en su transito hacia la zona saturada, situada en el edificio de Garafía (acuífero regional), donde se sitúan la mayoría de las galerías activas. Por el

contrario, la presencia de zonas de alteración superficiales y de intercalaciones de niveles menos permeables entre las coladas, favorece el desarrollo de flujos horizontales, que dan lugar a pequeños manantiales colgados en el edificio de Taburiente (flujo local). Se establece de esta manera una circulación local, marcada por la existencia de pequeños manantiales colgados, y un flujo regional, más lento y difuso, con una potente zona no saturada. Esta disposición geométrica y la presencia de niveles de baja permeabilidad que ralentizan el transito de la recarga por la zona no saturada del acuífero es coherente con la respuesta prácticamente plana de los hidrogramas de las galerías. Por otro lado se considera que los diques verticales de baja permeabilidad (más abundantes en el sector central del edificio de Garafía y poco frecuentes en las coladas basálticas del edificio Taburiente superior), se disponen a modo de enjambre, compartimentando el acuífero en pequeñas celdas y generando niveles piezométricos discretos y ligeramente diferenciados. Con el modelo conceptual propuesto, la recarga natural (junto con los vertidos que se realicen), en la zona investigada del AIV, sufriría, en primer lugar, una retención en el suelo y en las zonas de alteración más superficiales, que favorecería la evapotranspiración (un 43% de la lluvia según CIAP, 2013). El agua restante percolaría el suelo y la capa de alteración más superficial y pasaría a circular, en una mínima parte, por los planos y capas de alteración y capas arcillosas, emergiendo por pequeños manantiales colgados y zonas de descarga difusa, sin llegar a alcanzar la zona saturada del acuífero de Garafía. El resto de agua tendrá que atravesar una potente zona no saturada (entre 385 y 625 m bajo las instalaciones del IAC), hasta alcanzar la zona saturada del acuífero. Una vez aquí, el agua se dirigirá hacia la costa, con velocidades de transito normales en este tipo de materiales hidrogeológicos.

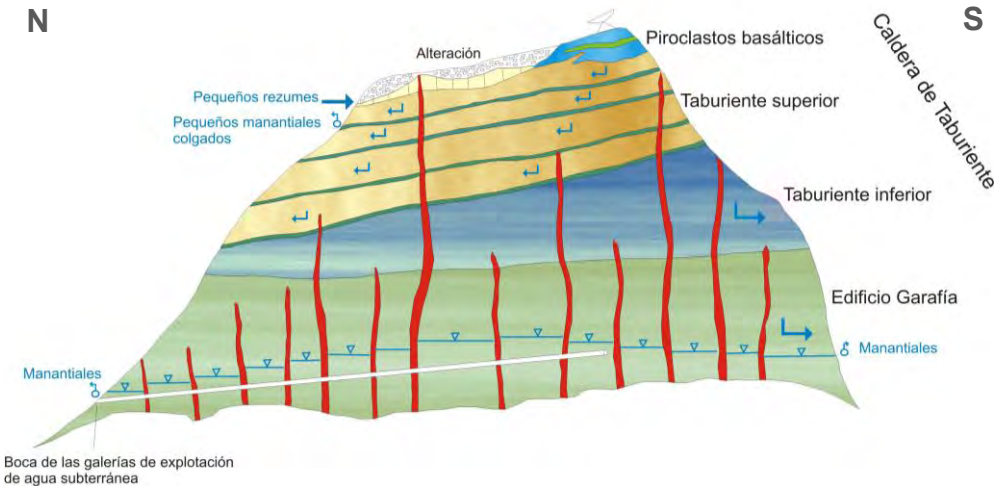


Figura 4. Esquema que representa el modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico propuesto.

CONCLUSIONES Y RECOMEDACIONES

La investigación hidrogeológica presentada ha permitido presentar un modelo conceptual de funcionamiento coherente con la información recopilada y generada con motivo de este trabajo. La respuesta de este sector del AIV es la de un acuífero inercial con una potente zona no saturada en la que no hay evidencia de vías verticales de flujo preferencial. El abombamiento de la superficie piezométrica en el núcleo de la isla y las crecidas de caudal que se producen al atravesar los diques verticales durante la perforación de las galerías sugieren que éstos apantallan el flujo radial y elevan el gradiente hidráulico, aumentando los tiempos de transito del agua subterránea en el acuífero.

Con todo, el análisis de la información existente en este importante acuífero para la isla de La Palma ha puesto de manifiesto que es necesario seguir avanzando en su conocimiento hidrogeológico. Se carece de puntos de control piezométrico en los principales sectores de recarga del acuífero. Esta falta de registros piezométricos impide cuantificar, entre otros aspectos, el ritmo de descenso que la superficie piezométrica está sufriendo como consecuencia del vaciado continuo de las galerías. No se dispone de datos relativos a las reservas de agua del acuífero. Asimismo, existe una importante incertidumbre en la evaluación de la recarga que se utiliza en la planificación hidrológica analizada. La recarga ha sido estimada mediante el cierre del balance. Además, en los cálculos de la lluvia que alcanza las principales zonas de recarga se ha tenido en cuenta un gradiente altitudinal lineal de la lluvia, que parece no existir, a tenor de los datos que se están midiendo en el pluviómetro del IAC. Por otro lado, los recursos estimados no han sido contrastados con los de otros métodos de cálculo independientes.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a todo el personal del IAC, del CIAP y a Roberto Poncela la colaboración prestada. Asimismo agradecemos al revisor su contribución en la mejora del presente trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CIAP (2006). *Informe sobre la caracterización hidroquímica e isotópica ambiental preliminar del acuífero asociado al túnel de trasvase. Funcionamiento hidrogeológico del sistema (Isla de la Palma).* Consejo Insular de Aguas de La Palma.124 pp

CIAP (2013). *Estado de las Masas de Agua Subterránea de La Palma.* Consejo Insular de Aguas de La Palma. Informe interno, 08-14/13. 107 pp.

Custodio, E. (1985). Low permeability volcanic in the Canary islands (Spain). Mem. IAH. 17(2): 562–73.

DGA (2005). *Actividades requeridas para el cumplimiento de la Directiva Marco del Agua en las islas de Tenerife, La Palma, la Gomera y El Hierro*. Dirección General de Aguas-Consejería de Infraestructuras, Transportes y Vivienda-Gobierno de Canarias. Santa Cruz de Tenerife. 135 pp.

IGME (2008). Mapa Geológico en continuo escala 1/25.000 Isla de La Palma

Poncela, R. y Skupien, E. (2008). *Características químicas e isotópicas del agua subterránea del acuífero volcánico de Cumbre Nueva (La Palma, Islas Canarias).* VII Congreso geológico de España. Las Palmas de Gran Canaria. Geo-Temas, 10. 825-828.

Poncela, R. y Skupien, E. (2011). *Características hidrogeológicas, químicas e isotópicas del agua subterránea del Acuífero Volcánico de las Vertientes en el entorno de los nacientes marcos y cordero (La Palma, Islas Canarias).* El conocimiento de los recursos hídricos en Canarias cuatro décadas después del proyecto SPA-15. 87-92 pp. ISBN: 978-84-938046-0-2.

Skupien, E. y Poncela, R. (2007). Contribución de los isótopos ambientales al conocimiento hidrogeológico del acuífero de Cumbre Nueva asociado al túnel de trasvase (Isla de La Palma). *XII Congreso Internacional de Energía y Recursos Minerales*. Oviedo, 7-11 de octubre. 13 pp.

SPA-15 (1975). *Estudio científico de los recursos de agua en las Islas Canarias*. SPA/69/515. Minist. Obr. Públ. Dir. Gral. Obr. Hidrául. UNESCO. Madrid-Las Palmas.

Veeger, A.I. (1991). *Geochemical methods for evaluating the origin and evolution of ground water in volcanic rocks*. Ph.D. Dissertation. University of Arizona. 239 pp.

ISBN: 978-84-938046-4-0

TENDENCIAS DE LA PRECIPITACIÓN EN CANARIAS

Pablo MÁYER SUÁREZ[1], María Victoria MARZOL JAÉN[2] y Juan Manuel PARREÑO CASTELLANO[1]

[1] Departamento de Geografía de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. c/ Pérez del Toro, 1, 35003 Las Palmas de Gran Canaria. pmayer@dgeo.ulpgc.es; jparreno@dgeo.ulpgc.es
[2] Departamento de Geografía e Historia. Universidad de La Laguna. C/ Campus de Guajara, 38070 La Laguna. mmarzol@ull.es

RESUMEN

Con el objetivo de conocer cuáles son las tendencias de la precipitación anual y estacional en las Islas Canarias, y así saber la evolución que está teniendo el recurso del agua en este territorio, se aplica el test de Mann Kendall a 27 series de precipitación mensual. Previamente se analiza la homogeneidad de cada una de ellas aplicando el Standard Normal Homogeneity Test (SHNT). Los resultados indican que se ha producido un descenso significativo de la precipitación en las vertientes septentrionales de Tenerife y Gran Canaria, siendo más acusado entre los 400 y 1.500 m de altitud. La disminución de la precipitación más notable se ha producido en el otoño; por el contrario, la primavera presenta, en la mayoría de las series, tendencias positivas, aunque sin significación estadística. Los resultados obtenidos evidencian la necesidad de disponer series pluviométricas largas en Canarias que mitiguen los efectos de la gran variabilidad interanual de la lluvia en los test estadísticos, así como aplicar índices de concentración que puedan caracterizar este rasgo de la precipitación.

Palabras clave: *tendencias de la precipitación, test de Mann-Kendall, SHNT, Islas Canarias.*

ABSTRACT

The aim of this work is to study the annual and seasonal precipitation trends in the Canary Islands by applying the Mann-Kendall test to 27 series of monthly precipitation, and thereby know what the evolution of the water resource in this territory. The homogeneity of each of the series were analysed beforehand by applying the Standard Normal Homogeneity Test (SNHT). The results show that there has been a significant decrease in precipitation in the northern slopes of islands of Tenerife and Gran Canary, and this decrease is most marked between 400 and 1,500 m altitude. The most significant decrease in precipitation has occurred in the autumn, on the other hand, there are positive tendencies in most of the series in the spring, although this is not statistically significant. The results obtained show the need to have long pluviometric series in the Canary Islands which mitigate the effects of the high inter-annual variability of the rainfall in the statistical tests as well as to apply concentration indexes which can characterize this feature of the precipitation.

Key words: *precipitation trend analysis, Mann-Kendall test, SHNT, Canary Islands.*

INTRODUCCIÓN

Recientemente el V Informe del IPCC (2013) muestra de manera real e inequívoca las señales de un cambio climático global. El informe realiza un exhaustivo análisis de las modificaciones térmicas producidas, y los indicios de cambios en la temperatura superficial del aire y de las capas medias y altas de la atmósfera, de los océanos, en los glaciares y en la salinidad de los océanos no tienen precedentes. Hay un 95% de probabilidad de que ese calentamiento, observado desde 1950, sea consecuencia de las actividades antrópicas. También se sabe que la respuesta del ciclo global del agua a este calentamiento a lo largo del siglo XXI no va a ser uniforme. El informe indica que en el peor de los escenarios, en el que no se reduzca la emisión de gases de efecto invernadero (Sendas Representativas de Concentración, RCP8,5 en las siglas en inglés) es probable que, para el final de este siglo, aumente la precipitación media anual en las latitudes altas y en el océano Pacífico ecuatorial y disminuya en muchas regiones secas de las latitudes medias y subtropicales. Sin embargo, más preocupante es la alta probabilidad que existe de que los fenómenos meteorológicos extremos se agudicen en la mayoría de las superficies emergidas situadas en latitudes medias y tropicales húmedas a medida que vaya aumentando la temperatura media global (IPCC, 2013).

En este contexto son múltiples los trabajos que, desde diversas perspectivas, tratan de averiguar las tendencias de la precipitación, tanto en sus valores medios anuales y estacionales como en los extremos y en las variaciones del número de días de lluvia. En el caso de España, los resultados difieren según los autores (Serrano et al., 1999; Del Río et al., 2011) ya que los primeros, concluyen que no existe una tendencia significativa en los totales anuales de precipitación mientras que los segundos señalan una disminución de la misma en los meses de febrero y junio, y un aumento en los de mayo, agosto, septiembre y octubre, aunque con bajos niveles de significación estadística. Otros estudios establecen diferencias espaciales entre el Norte de España, con tendencias positivas, y el Sur y Baleares con tendencias negativas, aunque sólo con significación estadística en el 85% de las series consideradas (Luna et al., 2012); entre las islas Baleares (Guijarro, 2001); a escala regional (Raso, 1996; Romero, 1988; Quereda et al., 2000; García, 2002; Guijarro, 2002; Saladié et al., 2002) o, incluso, centrados en una cuenca (Gil y López Bermúdez, 2011; Abaurrea et al., 2002; García-Marín, 2006). Es importante señalar los trabajos de Brunet et al. (2009) y Castro et al. (2005) porque apuntan que en las regiones subtropicales, como Canarias, no es fácil verificar el descenso de la precipitación debido a: (i) la complejidad de la distribución espacial de la precipitación tanto en su cuantía como en su concentración estacional y temporal y (ii) la elevada variabilidad temporal de la precipitación que obliga a disponer de series centenarias. En Canarias, García-Herrera et al. (2003) realizan un análisis de ocho estaciones pluviométricas con diferentes períodos temporales, cinco de ellas entre 1948 y 1998 y tres entre 1970 y 1998. Aplican el cálculo de tendencias de Karl y Knight (1998) y los resultados obtenidos evidencian una fuerte tendencia negativa de la precipitación en las localidades situadas en las vertientes septentrionales de Tenerife y de Gran Canaria, mientras que en las ubicadas en la vertiente SE los valores son más reducidos y nada significativos. Este decremento obedece, según estos autores, a una disminución de la contribución de los percentiles más altos a la precipitación total. Tampoco hay tendencias significativas en las islas de La Palma y Fuerteventura, mientras que en la de Lanzarote se señala un aumento de la precipitación de +2,68%. Por otro lado, De Luque y Martín-Esquivel (2011), a partir del análisis de 459 series de La Palma, Tenerife y Gran Canaria, reconstruyen series de referencia estandarizadas y homogéneas para las principales orientaciones y altitudes de las tres islas y tras su comparación con un período de referencia (1970-1999) llegan a las siguientes conclusiones: (i) hay tendencias negativas en la precipitación anual en el NE de la isla de La Palma (-4 mm/año en el período 1935-2009) y menos evidente en Gran Canaria (-1 mm/año en el período 1951-2008). (ii) Las vertientes norte de Gran Canaria y Tenerife tienen tendencias negativas de la precipitación

(-2 mm/año), mientras que en La Palma, entre 0-400 m, la tendencia es positiva (4 mm/año). No obstante estas tendencias son estadísticamente poco significativas. (iii) Las vertientes meridionales de Gran Canaria y Tenerife no tienen tendencias claras aunque, en general, se detectan incrementos del orden de 2-3 mm/año; mientras que en el suroeste de La Palma se ha estimado una tendencia negativa de -4 mm/año (1935-2009) con una alta significación estadística (95%). Finalmente, Tarife et al. (2012) analizan los eventos de precipitación extrema en Canarias en 46 estaciones distribuidas por el archipiélago canario, en el período 1970-2010, y los resultados evidencian, aplicando el estadístico de Mann-Kendall, una tendencia hacia la concentración de la precipitación y, a consecuencia de ello, una mayor frecuencia de eventos extremos.

En definitiva, los estudios realizados hasta el momento demuestran, con notables diferencias espaciales y escasa significación estadística, que la tendencia de la precipitación anual en Canarias es a reducirse salvo en Lanzarote y algunos sectores del norte de La Palma en los que parece haber una tendencia positiva (García-Herrera et al., 2003). Por ello, el objetivo de este trabajo es profundizar en este análisis y determinar cuál es la contribución mensual y estacional a estas tendencias, estableciendo su significación estadística. Se parte de la premisa de que resulta difícil cuantificar la tendencia de la precipitación en Canarias con un nivel de significación alto porque es una de las regiones de España donde la variabilidad de la lluvia es más acusada (Máyer y Marzol, 2012; Dorta, 2000) y su concentración durante el invierno y variabilidad interanual muy significativas (Marzol et al., 2006).

LOS DATOS Y EL MÉTODO

De todas las series disponibles se han seleccionado aquellas que presentan una mayor continuidad temporal y, además, carecen de lagunas –gaps- en sus datos o, si las presentan, son sólo en alguno de los meses de la serie. En la tabla 1 se muestra la altitud, la longitud temporal de cada una de ellas, los valores de la media y los coeficientes de variación mientras que en la figura 1 su localización espacial. Se analizan 27 estaciones a escala anual y estacional. Las estaciones del año se consideraron de la siguiente manera: invierno (diciembre, enero y febrero), primavera (marzo, abril y mayo) y otoño (septiembre, octubre y noviembre). El verano no se analiza pues en Canarias la precipitación estival es, en todas las series seleccionadas, inferior al 5% de la precipitación anual. Hay que señalar que este método ha sido utilizado en múltiples trabajos para el análisis de tendencias no sólo en climatología, especialmente aplicado a las precipitaciones, sino también a otros fenómenos naturales como flujos de corrientes fluviales o calidad del agua (Del Río, et al., 2011). Sólo en la estación Los Llanos de Aridane, en la isla de La Palma, ha sido necesario realizar la combinación (superposición) de series próximas; es el caso de las estaciones C128A y C128B de la AEMET. La primera comienza sus datos en 1947 y finaliza en 1998 con diversas discontinuidades desde 1986 mientras que la segunda inicia los registros en 1961 hasta la actualidad sin apenas gaps. La diferencia de ubicación entre una y otra estación es de apenas 250 metros y la correlación es de 0,96. De la unión de ambas se obtiene una serie completa y homogénea de 1947 a 2013. En otros casos donde existe ausencia de datos pero hay estaciones próximas, el dato ausente se obtiene de la combinación lineal ponderada de las series próximas siempre y cuando el coeficiente de correlación de Pearson supere el valor de 0,8. Finalmente, en los escasos meses en los que no fue posible completar las series con otras vecinas se utilizó el método de las proporciones (Castro-Llano y Carvajal-Escobar, 2013). Cuando se desconoce la precipitación de un mes cualquiera, se establece una razón de proporcionalidad entre la precipitación mensual y anual de la siguiente manera:

$$\frac{x_i}{X_i} = \frac{P_f}{P_a - X_i}$$

Donde x_i es la precipitación del mes ausente, X_i el promedio de la precipitación del mes ausente, P_f la precipitación total anual del mes ausente, P_a el promedio total anual.

Tabla 1: Características principales de las series pluviométricas utilizadas en el análisis.

CD	NOMBRE	Alt	Serie	$\bar{x}$	CV	CD	NOMBRE	Alt	Serie	$\bar{x}$	CV
1	Llanos de Aridane	410	1947-2013	400,5	39,7	15	La Culata de Tejeda	1180	1950-2013	547,8	52,4
2	Anaga-Taganana	402	1947-2013	568,4	38,2	16	Lomo Aljorradero	1075	1928-2013	590,7	38,3
3	S/C Cruz de Tenerife	35	1938-2013	238,6	38,9	17	San Bartolomé	880	1945-2013	377,0	61,0
4	Izaña	2371	1919-2000	449,5	55,6	18	Haría	270	1950-2013	192,2	40,3
5	Presa de Jiménez	240	1950-2013	271,5	35,8	19	Guatiza	95	1952-2012	134,6	45,3
6	Heredad de Arucas	250	1936-2013	289,6	37,8	20	Tinajo	180	1952-2012	134,4	56,2
7	Tamaraceite	200	1950-2013	257,8	42,8	21	Puerto Mármoles	10	1943-2012	80,2	59,6
8	Las Palmas	55	1936-2013	140,0	43,5	22	Mácher	190	1950-2012	153,0	42,1
9	Teror	630	1936-2013	533,5	28,3	23	Guacimeta	25	1946-2012	117,3	46,9
10	Valleseco	980	1946-2013	776,1	33,6	24	Femés	350	1952-2012	166,3	46,3
11	La Retamilla	1400	1950-2013	900,6	37,0	25	Pechiguera	30	1943-2012	97,9	52,9
12	Pinar de Tamadaba	1255	1935-2009	592,8	33,6	26	Castillo de Lara	470	1952-2011	196,3	41,0
13	San Nicolás	80	1949-2013	154,9	55,2	27	Morro Jable	100	1952-2013	91,9	50,2
14	Pinar de Pajonales	1190	1936-2009	391,4	54,6						

Fuente: Aemet y Consejos Insulares de Agua. CD: Código de la estación; Alt: Altitud sobre el nivel del mar en metros; N: número de años de la serie; $\bar{x}$: media aritmética; CV: Coeficiente de Variación.

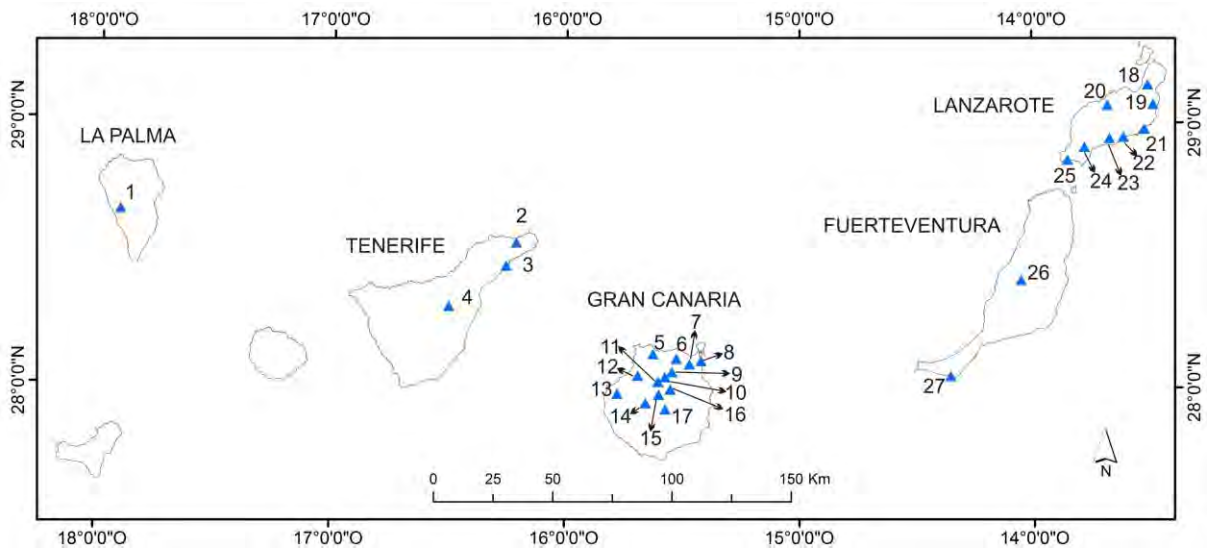


Figura 1. Localización espacial de las estaciones pluviométricas utilizadas.

Con el fin de poner a prueba la homogeneidad absoluta de los registros y detectar posibles errores se ha aplicado el Standard Normal Homogeneity Test (SHNT), definido por Alexandersson (1986) y modificado posteriormente por Alexandersson y Mogreb (1997). El siguiente paso fue aplicar el test no paramétrico de Mann-Kendall para determinar las series que presentan una tendencia lineal en la precipitación total estacional y anual. Para facilitar

el análisis hay hojas de cálculo disponibles en la red como la realizada por el Instituto Meteorológico de Finlandia (Salmi et al., 2002) denominado MAKESENS Microsoft Excel así como el módulo XLSTAT también de Microsoft Excel.

RESULTADOS

Al aplicar el SHNT a las series (27 anuales y 81 estacionales), 15 de ellas han resultado ser no homogéneas. No obstante hay que señalar lo siguiente: (i) todas las series son homogéneas en primavera, lo que implica una menor variabilidad interanual de la lluvia en esta estación del año y (ii) el SHNT, que permite identificar las inhomogeneidades o puntos de ruptura de las series, indica que en la mayoría de las series estudiadas esa ruptura se produce en torno al año 1959. En este sentido hay que indicar que la mayor parte de las estaciones pluviométricas comienzan a principios de la década de 1950 y que ese primer lustro fue de los más lluviosos en Canarias. Sería ilógico deducir que todos los observadores tomaran mal los datos en las mismas fechas y tampoco hay constancia de cambios en el instrumental o de ubicación de los pluviómetros. Por tanto, no hay motivo para desechar las series, máxime cuando una de ellas, la de Lomo Aljorradero, en medianías del NE de Gran Canaria, también registró importantes cantidades de lluvia en la década de los 50 y, sin embargo, supera el test. En este caso la longitud de la serie,1928-2013, "diluye" el efecto perturbador de los años 1950.

Con respecto a los resultados del análisis del test de Mann-Kendall, doce series lo superan con un nivel de significación del 95% y otras cinco lo hacen al 90%. Ello supone un 16% de las series. Se considera que determinar tendencias de la precipitación con niveles de significación inferiores al 90% carece de sentido estadístico, máxime en un archipiélago donde la alta variabilidad de la precipitación es una de sus características principales. De las tres estaciones del año consideradas, el otoño es la que tiene un mayor número de series con una tendencia negativa significativa; es el caso de las ubicadas en las zonas de altitud media y alta de Gran Canaria, Las Palmas de Gran Canaria -en la costa NE-, e Izaña, en la cumbre de Tenerife. En invierno, sólo dos localidades tienen tendencias negativas significativas, Valleseco y La Retamilla, en la vertiente septentrional de Gran Canaria y por encima de 950 metros. En cambio, la primavera reúne el mayor número de series con tendencia positiva (33% de las series) aunque sin significación estadística.

Con respecto a las tendencias anuales de la precipitación, nueve series tienen un descenso significativo y todas ellas están situadas en zonas de altitud media, orientadas al N y NE, como es el caso de Taganana en Tenerife, todas las del norte de Gran Canaria, incluida la de la capital y, finalmente, La Culata de Tejeda en el SW de esta isla. Por último, hay que señalar la poca significación estadística de las tendencias de las series en las islas de Lanzarote y Fuerteventura, si bien existen diferencias entre el norte de Lanzarote (p.e. la estación de Haría donde la precipitación muestra una tendencia negativa) y el resto de la isla que, generalmente, experimenta un aumento de la lluvia en primavera e invierno y una reducción en otoño aunque sin significación estadística. En la tabla 2 se muestran los resultados obtenidos en todas las localidades para cada una de las estaciones del año consideradas y la variación anual. Se utiliza el mismo criterio que Luna et al., 2012 al mostrar el valor absoluto del logaritmo en base 10 del p-valor del test de Mann Kendall. Resultan significativas al 5% aquellas tendencias cuyo logaritmo supere el valor de 1,3, al tiempo que el signo indica la tendencia positiva (+) o negativa (-), es decir un aumento o una reducción de la precipitación. En color verde se remarcan las tendencias más significativas que superan el test con un nivel de significación de más del 90%. Como puede observarse las medianías son las que evidencian los descensos más acusados de la precipitación, entre los 0,6 mm/año de Las Palmas de Gran Canaria y los 9 mm/año de La Retamilla, la localidad más húmeda de la isla de Gran Canaria. También se evidencia que el otoño es la estación del año donde la disminución de la precipitación ha sido más significativa, entre 0,4

mm/año en Las Palmas de Gran Canaria y 1,5 mm/año en Izaña.

Tabla 2. Tendencias en la precipitación anual y estacional en las 27 series consideradas. Los valores representan el valor absoluto del logaritmo en base 10 del p-valor del test de Mann-Kendall. En la columna de la derecha se muestran los descensos de la precipitación (mm/año).

NOMBRE	Logaritmo en base 10 de P-Valor del test de Mann-Kendal				Descenso de la precipitación en mm/año			NOMBRE	Logaritmo en base 10 de P-Valor del test de Mann-Kendal				Descenso de la precipitación en mm/año		
	P	O	I	A	O	I	A		P	O	I	A	O	I	A
Llanos de Aridane	0,3	-0,6	0,0	-0,4				La Culata de Tejeda	-0,2	-1,5	-0,8	-2,3			-2,2
Anaga-Taganana	0,7	-0,7	-0,5	-1,1			3,3	Lomo Aljorradero	-0,1	-1,8	-0,4	-1,0		-1,2	
Santa Cruz de Tenerife	0,2	-0,9	-0,4	-0,7				San Bartolomé	0,1	-0,5	0,1	-0,3			
Izaña	0,0	-1,5	-0,3	-0,1	-1,5			Haría	-0,3	-0,1	-0,2	-0,2			
Presa de Jiménez	-0,3	-1,1	-0,7	-2,0	1,1		1,9	Guatiza	0,3	-0,1	0,3	0,4			
Heredad de Arucas	0,0	-0,9	-0,7	-1,5			-1,1	Tinajo	0,8	0,3	0,3	0,7			
Tamaraceite	-0,5	0,8	-0,1	-1,2			-1,6	Puerto Mármoles	0,4	-0,1	0,2	0,2			
Las Palmas	-0,3	-1,4	-0,3	-1,2	-0,4		-0,6	Mácher	0,7	-0,1	-0,1	0,0			
Teror	0,4	-1,4	-0,3	-0,8	0,9			Guacimeta	0,0	-0,2	-0,1	-0,5			
Valleseco	-0,3	-0,8	-1,9	-2,8		3,5	-5,5	Femés	0,4	0,0	0,1	0,0			
La Retamilla	-0,7	-0,9	-2,7	-5,0		6	9	Pechiguera	0,9	0,0	0,5	0,6			
Pinar de Tamadaba	0,3	-0,5	-0,6	-0,6				Castillo de Lara	-0,1	-0,3	0,1	-0,1			
San Nicolás	0,3	-0,5	0,0	-0,4				Morro Jable	0,4	0,0	0,0	-0,2			
Pinar de Pajonales	0,2	-0,6	0,3	0,2				Fuente: Aemet y Consejos Insulares de Agua							

P: Primavera; O: Otoño; I: Invierno; A: Año

DISCUSIÓN

Es la primera vez que se aplica el test de Mann-Kendall en el análisis de las series de precipitación anual y estacional en las islas Canarias. Los resultados, aunque poco concluyentes debido a la escasa significación estadística de muchas de las series, concuerdan con otros estudios realizados que, con otras metodologías, evidencian descensos de la precipitación anual en las vertientes septentrionales y poco significativos en las meridionales. La gran variabilidad de la precipitación en las islas, con años muy lluviosos intercalados entre otros secos o muy secos, períodos húmedos o muy húmedos con prolongadas sequías, exige la utilización de series de datos muy amplias para poder obtener unos niveles de significación similares a los de otras regiones donde la variabilidad de la lluvia es menor. Lo ocurrido el 31 de marzo de 2002 en Santa Cruz de Tenerife ratifica la necesidad de emplear series amplias en Canarias porque muestra lo que puede aportar un único episodio lluvioso al total mensual del año de una serie y cómo eso modifica la tendencia final de la misma. El 31 de marzo de 2002 la precipitación contabilizada en Santa Cruz de Tenerife fue de 233,0 mm. Esa cifra multiplica por 7,5 la media del mes de marzo (30,9 mm), además supuso el 92% de las precipitaciones de ese mes y el 50% de ese año.

En la figura 2 se muestra el efecto que causa este tipo de episodios en la tendencia final de la serie de la primavera en Santa Cruz de Tenerife. La figura 2(a) se ha modificado excluyendo el dato del mes de marzo y se ha sustituido por el método de las medias ponderadas ya indicado, mientras que en la figura 2(b) se muestra la serie sin modificar. Como puede observarse las tendencias cambian.

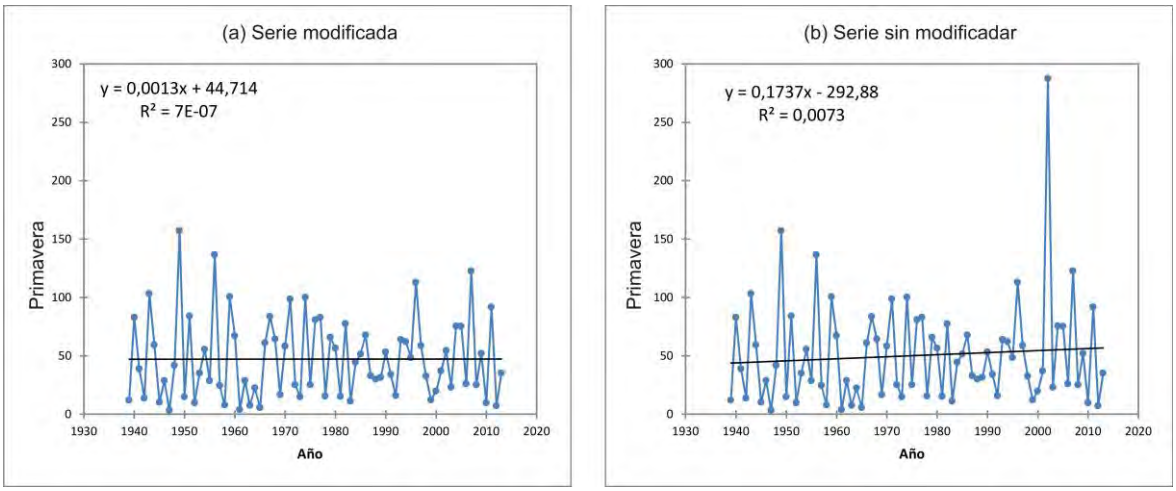


Figura 2. Variación de la tendencia de la precipitación de la primavera en Santa Cruz de Tenerife (a) excluyendo el episodio del 31 de marzo de 2002 y (b) incluyéndolo.

Así pues, en Canarias es preciso considerar el peso de estos episodios lluviosos, no sólo por sus consecuencias en la población y la imposibilidad de aprovechar el recurso del agua sino también por los efectos que tienen sobre los totales pluviométricos. Es preciso profundizar en metodologías estadísticas que valoren la significación de la tendencia de la precipitación en regiones donde la variabilidad de ésta es muy acusada y, sobre todo, en el análisis de la respuesta interanual de los diferentes índices de concentración de la precipitación que, aplicado a Canarias, puede mostrar una tendencia hacia un incremento de los eventos más intensos tal y como ya han señalado otros autores (García-Herrera et al., 2003; Tarife et al., 2012).

REFERENCIAS

Abauerra, J.; Asís, J. y Centelles, A. (2002). *Caracterización espacio-temporal de la evolución de la precipitación anual en la cuenca del Ebro*. En: Guijarro, J.A.; Grimalt, M.; Laita, M. y Alonso, S. (Eds.): *El agua y el clima*. Asociación Española de Climatología. Serie A, 3: 113-124.

Alexandersson, H. (1986). *A homogeneity test applied to precipitation data*. Journal of Climatology. 6: 661–675.

Alexandersson, H. y Mogreb, A. (1997). *Homogenization of Swedish temperature data. Part I: homogeneity test for linear trends*. I. Journal of Climatology 17: 25-34.

Brunet, M.; Casado, M.J.; De Castro, M.; Galán, P.; López, J.A.; Martín, J.M.; Pastor, A.; Petisco, E.; Ramos, P.; Ribalaygua, J.; Rodríguez, E.; Sanz, I. y Torres, L. (2009). *Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España*. Aemet. Madrid. 158 pp.

Castro, M.; Martín-Vide, J. y Alonso, S. (2005). *El clima de España: pasado, presente y escenarios de clima para el siglo XXI*. En Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático. Informe del Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. 64 pp.

Castro‐Llanos, D. A. y Carvajal‐Escobar, Y. (2013). *Análisis de tendencia en la precipitación pluvial anual y mensual en el departamento del Valle del Cauca*. Memorias 11(20): 9-18.

De Luque, A. y Martín-Esquivel J.L. (2011). *Cualificación y homogenización de las series climáticas mensuales de precipitación de Canarias. Estimación de Tendencias de la Precipitación*. Memoria Explicativa de Resultados. Agencia Canaria de Desarrollo Sostenible y Cambio Climático, Gobierno de Canarias. Santa Cruz de Tenerife. 114 pp.

Del Río, S.; Herrero, L.; Fraile, R. y Penas, A. (2011). *Spatial distribution of recent rainfall trends in Spain* (1961-2006). International Journal of Climatology 31: 656-667.

Dorta, P. (2000). *Algunas notas sobre la evolución histórica y metodológica de los estudios del clima de Canarias: estado actual de la cuestión*. XIII Coloquio de Historia canario-americana. Excmo. Cabildo Insular de Gran Canaria. Las Palmas de Gran Canaria: 1602-1620.

García, L. (2002). *Evolución de las precipitaciones estacionales en el suroeste español: posibles*

efectos ambientales. En: Guijarro, J.A.; Grimalt, M.; Laita, M. y Alonso, S. (Eds.): *El agua y el clima*. Asociación Española de Climatología. Serie A, 3: 209-218.

García-Herrera, R.; Gallego, D.; Hernández, E.; Gimeno, L.; Ribera, P. y Calvo, N. (2003). *Precipitation Trends in The Canary Islands*. International Journal of Climatology 23: 235-241.

García-Marín, R. (2006). *Evolución y tendencias de la precipitación estacional en la cuenca del Guadalentín (Murcia-Almería) Posibles efectos en la práctica agrícola de secano*. Nimbus 17-18: 43-65.

Gil, S. y López-Bermúdez, F. (2011). *Tendencias de las precipitaciones y temperaturas en una pequeña cuenca fluvial del Sureste peninsular semiárido*. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles 56: 349-371.

Gujarro, J.A. (2001). *Problemática de la detección del cambio climático en Baleares.* En: Pons, G.X. y Guijarro, J.A. (Eds.): *El canvi climatic*. Monografie Societat Historia Natural Baleares, 9: 147-158.

Guijarro, J.A. (2002). *Tendencias de la precipitación en el litoral mediterráneo español*. En: Guijarro, J.A.; Grimalt, M.; Laita, M. y Alonso, S. (Eds.): *El agua y el clima*, Asociación Española de Climatologia. Serie A, 3: 427-436.

IPCC, (2013). *Resumen para responsables de políticas*. En: Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (Eds.): *Cambio Climático Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Cambridge University Press. UK. 27 pp.

Karl, T.R. y Knight, R.W. (1998). *Secular trends of precipitation amount, frequency and intensity in the Unites States*. Bulletin of the American Meteorological Society 79 (2): 231 – 241

Luna, M.Y.; Guijarro, J.A. y López-Díaz, J.A. (2012). *Reconstrucción, homogeneidad y tendencias de las series históricas de precipitación mensual acumulada en la España peninsular y las islas Baleares*. En: Rodríguez-Puebla, C.; Ceballos, A.; González-Reviriego, N.; Morán, E. y Hernández-Encinas, A. (Eds.): *Cambio Climático. Extremos e Impactos*. Asociación Española de Climatología. Serie A, 8: 499-507.

Marzol, Mª V., Yanes, A., Romero, C., Brito de Acevedo, E., Prada, S. y Martins, A. (2006). *Los riesgos de las lluvias torrenciales en las islas de la Macaronesia (Azores, Madeira, Canarias y Cabo Verde)*. En: Cuadrat, J.M.; Saz, M.A.; Vicente, S.M.; Lanjeri, S.; de Luis, M.; y González-Hidalgo J.C. (Eds.): *Clima, Sociedad y Medio Ambiente*. Zaragoza, Asociación Española de Climatología, Serie A, 5: 443-452.

Máyer, P. y Marzol, Mª V. (2012). *La concentración y la agresividad de la lluvia en las islas de la Macaronesia*. En: Royé, D., Aldrey, J.A., Valcárcel, M., Pazos, M. y Piñeira, M.J. (Eds.): *XIII Coloquio Ibérico de Geografía. Respuestas de la Geografía Ibérica a la crisis actual.* Galicia (España), 896 - 906.

Quereda, J.; Monton, E. y Escrig, J. (2000). *La evolución de las precipitaciones en la cuenca occidental del Mediterráneo: ¿Tendencia o ciclos?*. Investigaciones Geográficas 24: 17-35.

Raso, J.M. (1996). *Variación de las precipitaciones de primavera en el sur de la España peninsular durante el Siglo XX*. En: Marzol, Mª V.; Dorta, P.; Valladares, P (Eds.): *Clima y Agua*. Tabapress. Madrid, 123-132.

Romero, R.; Guijarro, J.A. y Alonso S. (1998). *A 30-year (1964–1993) daily rainfall data base for the Spanish Mediterranean regions: first exploratory study*. International Journal of Climatology 18: 541–560.

Saladié, O.; Brunet, M.; Aguilar, E.; Sigro, J. y López, D. (2002). *Evolución de la precipitación en el sector suroriental de la depresión del Ebro durante la segunda mitad del siglo XX*. En: Guijarro, J.A.; Grimalt, M.; Laita, M. y Alonso, S. (Eds.): *El agua y el clima*. Asociación Española de Climatología. Serie A, 3: 427-436.

Salmi, T.; Määttä, A.; Anttila, P.; Ruoho-Airola, T. y Amnell, T. (2002). *Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and sen's slope estimates -the excel template application Makesens*. Finnish Meteorological Institute. Helsinki. 35 pp.

Serrano, A.; Mateos V.L. y García J.A. (1999). *Trend analysis of monthly precipitation over the Iberian Peninsula for the Period 1921–1995*. Physics and Chemistry of the Earth 24 (1–2): 85–90.

Tarife, R.; Hernández, S.; Gámiz-Fortis, S.R.; Castro-Díez, Y. y Esteban-Parra, M.J. (2012). *Análisis de los extremos pluviométricos en las islas Canarias y su relación con el índice NAO*. En: Rodríguez, C.; Ceballos, A.; González, N.; Morán, E. y Hernández, A. (Eds.): *Cambio climático extremos e impactos*. Asociación Española de Climatología. Serie A, 8: 659-668.

ISBN: 978-84-938046-4-0

DETERMINACIÓN DE CONTAMINANTES EMERGENTES EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL NORESTE DE GRAN CANARIA

Sarah MONTESDEOCA-ESPONDA[1], Esmeralda ESTÉVEZ[2], MCarmen CABRERA[2], Zoraida SOSA-FERRERA[1] y José Juan SANTANA-RODRÍGUEZ[1]

[1] Departamento de Química, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 35017 Las Palmas de Gran Canaria. smontesdeoca@becarios.ulpgc.es, zoraida.sosa@ulpgc.es, josejuan.santana@ulpgc.es
[2] Departamento de Física, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 35017 Las Palmas de Gran Canaria. eestevez@proyinves.ulpgc.es, mcarmen.cabrera@ulpgc.es

RESUMEN

La presencia de fármacos en el medio natural constituye una creciente preocupación dados los efectos adversos que pueden presentar. Después de ser consumidos y excretados, llegan a las estaciones depuradoras de aguas residuales, en las que pueden no ser eliminados completamente. La reutilización de aguas depuradas para riego puede ser una fuente de contaminación en el agua subterránea, por lo que se ha llevado a cabo un estudio en el acuífero subyacente a un campo de golf regado con aguas depuradas desde 1973 en el NE de Gran Canaria. Las muestras seleccionadas proceden de agua de riego, agua de lixiviado del suelo y aguas subterráneas. Los compuestos determinados fueron atenolol (β-bloqueante), metamizol (analgésico), fluoxetina (antidepresivo), cafeína (estimulante) y su metabolito la paraxantina, así como nicotina y permetrina. Ya que estos analitos se encuentran en muy bajas concentraciones en el medio, es necesario emplear una técnica de preconcentración, en nuestro caso la extracción en fase sólida, antes de su análisis por cromatografía liquida con detección por espectrometría de masas en tándem. Se analizaron previamente las muestras procedentes de 16 puntos de agua, seleccionando las cinco localizaciones donde se midieron las mayores concentraciones de los compuestos estudiados y se llevó a cabo un seguimiento anual de los mismos.

Palabras clave: *Fármacos, aguas regeneradas, reutilización, aguas subterráneas*

ABSTRACT

The presence of pharmaceutical compounds in the environment is a growing concern due to the negative effects that they can exert. These compounds are present in the effluent of wastewater treatment plants due to the inefficiency of removal mechanisms. The reuse of treated wastewater can be a source of contamination in groundwater. We have carried out a study in an aquifer below a golf course located at NW of Gran Canaria island, which has been irrigated since 1973 with treated water. The taken samples included groundwater, irrigation water and soil water. The target analytes were atenolol (β-blocker), metamizole (analgesic), fluoxetine (antidepressant),caffeine (stimulant) and their metabolite the

paraxanthine, as well as the nicotine and permethrin. Because these compounds are present in very low concentrations in the environment, it is necessary to employ a purification technique. Solid phase extraction, prior to the liquid chromatography coupled to mass spectrometry detection, was used in our study. First, we analysed 16 samples from different water points and, after that, we chose five points that presented the higher concentrations for an annual monitoring.

Key words: *Pharmaceuticals, treated wastewater, water reuse, groundwater.*

INTRODUCCIÓN

Los contaminantes emergentes pueden definirse como aquellos compuestos químicos cuya presencia en el agua se ha detectado recientemente debido a la mejora en las técnicas de detección analíticas y cuyos efectos sobre la salud y el medio ambiente causan una preocupación creciente (Afonso-Olivares et al. 2013). En este campo se incluyen productos farmacéuticos, de higiene personal, plaguicidas y desinfectantes entre otros (Casas et al., 2011). Estos contaminantes se encuentran en aguas subterráneas, donde llegan procedentes de efluentes de aguas residuales o reutilizadas, fosas sépticas, actividades ganaderas y agrícolas o efluentes de hospitales (Lapworth et al. 2012), aunque pueden sufrir varios procesos en su camino hacia el acuífero (adsorción, intercambio iónico y degradación microbiana o transformaciones), o bien en el propio acuífero (dilución, adsorción y degradación). Todos estos procesos dependen de multitud de factores, unos dependientes del propio material que atraviesa el agua y otros dependientes del clima.

La reutilización de aguas regeneradas para riego es una práctica indicada en zonas con recursos hídricos escasos, dado que ofrece un suministro garantizado para la agricultura. En Gran Canaria se ha reutilizado el agua depurada desde hace más de treinta años, de forma que actualmente estas aguas constituyen un 8% del total de recursos hídricos de la isla (CIAGC, com. per.). La calidad del agua a reutilizar ha ido mejorando a lo largo del tiempo, de forma que desde el año 2002 existe una planta de ósmosis inversa para disminuir la salinidad del efluente de la depuradora de la ciudad de Las Palmas de Gran Canaria.

Esta comunicación presenta los primeros resultados de contaminantes emergentes obtenidos dentro del proyecto CONSOLIDER-TRAGUA, desarrollado entre 2009 y 2013. En Gran Canaria, se seleccionó el acuífero del NE de la isla, donde se sitúa el campo de golf de Bandama, que ha sido regado con aguas depuradas de la EDAR de Las Palmas de Gran Canaria desde 1976. En el contexto del proyecto se determinaron siete contaminantes emergentes seleccionados en el Laboratorio del Grupo de Investigación de Análisis Químico Medioambiental de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria para el establecimiento de una red de control. La misma red de control fue objeto de muestreos posteriores llevándose a cabo determinaciones de un mayor número de contaminantes emergentes (orgánicos y metales pesados) en la Universidad de Jaén, cuyos resultados han sido publicados en Estévez et al., 2012 y Estévez et al., 2013.

LA ZONA DE ESTUDIO

El campo de golf de Bandama está situado en la Cuenca de Las Goteras, entre los 400 y los 500m de altura (Figura 1). Los materiales que afloran en los alrededores del campo de golf son lavas y piroclastos basálticos holocenos (2.000 años de antigüedad), emitidos en las erupciones que cubrieron de cenizas más de 50 km^2 y dieron lugar al Pico y la Caldera de Bandama (Hansen y Moreno, 2008). Estos materiales se situaron sobre materiales basálticos fracturados y brechas deslizadas (Grupo Roque Nublo) de edad Pliocena que

cubren materiales fonolíticos del Mioceno. En el resto de la cuenca afloran además basanitas pertenecientes al vulcanismo post-Roque Nublo y materiales sedimentarios de la Formación detrítica de Las Palmas hacia la costa. El flujo subterráneo en la zona de estudio tiene lugar de cumbre a costa, siguiendo el esquema general para la isla. La piezometría de la zona permite identificar la existencia de un camino preferencial por el Barranco de Las Goteras y de una línea de flujo entre el campo de golf y dicho barranco. El nivel piezométrico se sitúa a unos 250 m por debajo del campo de golf y a unos 100 m del fondo de la Caldera (Figura 1).

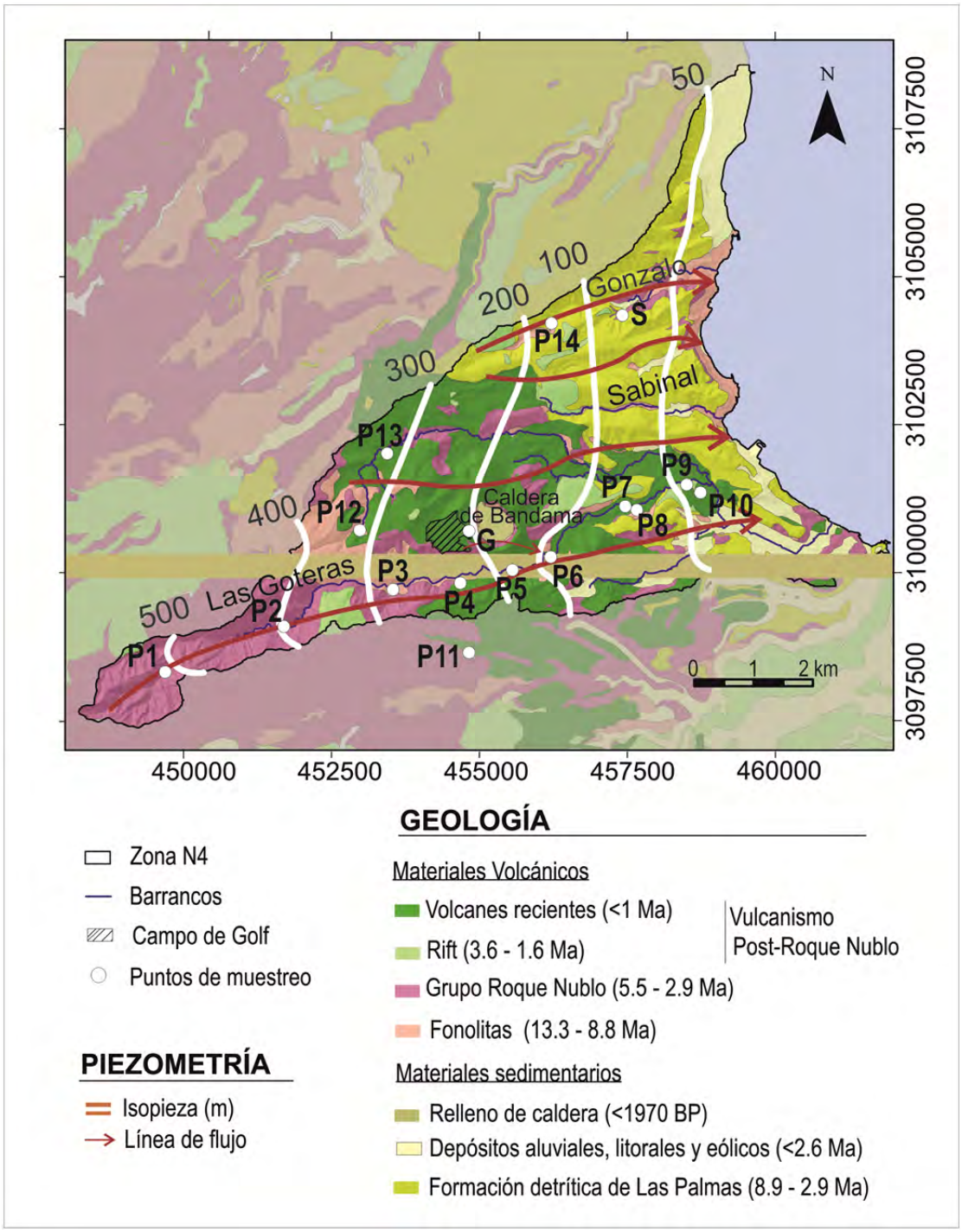


Figura 1. Localización espacial de los puntos de muestreo. Se muestra también la geología superficial y la piezometría de la Cuenca de Las Goteras.

La situación de los puntos muestreados se recoge en la Figura 1. Se trata en su mayor parte de pozos tradicionales canarios, con diámetros entre 2.5 y 3 m, profundidades entre 15 y 300 m y caudales medios diarios inferiores a 1 Ls^{-1}. El agua es utilizada para riego y procede de diferentes formaciones según la profundidad del pozo. Se ha muestreado también un sondeo de 33 cm de diámetro y una galería de agua de unos 40 m de profundidad situada en la pared de la Caldera de Bandama, a unos 60 m por debajo del campo de golf. La galería drena un acuífero colgado delimitado en la base por arcillas de brechas deslizadas del Roque Nublo, con un caudal constante de unos 0,05 Ls^{-1} e integra el agua de los retornos de riego del campo de golf de Bandama.

METODOLOGÍA

Selección de los compuestos y toma de muestras

Los compuestos seleccionados fueron nicotina, cafeína y su metabolito paraxantina, atenolol, metamizol, ibuprofeno, permetrina y fluoxetina. La selección se realizó atendiendo a la sospecha de su ubicuidad debido al amplio uso que tienen.

Entre noviembre de 2008 y febrero de 2009 se llevó a cabo un muestreo extenso que incluyó agua de riego tomada en un aspersor y en el estanque, agua del suelo procedente de un lisímetro instalado en el campo de golf, 13 muestras de aguas de pozo, una muestra de agua de sondeo y dos muestras de agua de una galería. A partir de este muestreo, se diseñó una red de control que incluyó agua de riego, agua del suelo, una galería de agua y cinco pozos situados a lo largo del Barranco de Las Goteras. Esta red fue muestreada trimestralmente durante 2009. Las muestras se tomaron en botellas de vidrio ámbar (1L) con tapones de teflón. Todas las botellas se conservaron inmediatamente en frío y fueron analizadas antes de 24 horas. Las muestras de agua de riego se recogieron en la toma de un aspersor directamente en el campo de golf o en el estanque donde se almacena el agua de riego. La muestra de agua del suelo se tomó en un lisímetro instalado en el suelo del campo de golf. La galería se muestreó en el depósito que recoge el agua situado a unos 100 m de la boca y los pozos se muestrearon después de un tiempo prudencial de bombeo.

Análisis de las muestras

Debido a la baja concentración a la que se encuentran los compuestos estudiados en este tipo de muestras, fue necesario emplear un método de extracción y preconcentración previo a la determinación analítica. La metodología escogida está basada en la extracción en fase sólida, debiendo optimizarse todos los parámetros involucrados en la eficiencia de extracción que nos permitan obtener recuperaciones satisfactorias para todos los analitos. Las condiciones óptimas para la extracción son las siguientes: sorbente tipo Oasis HLB (balance hidrofílico-hidrofóbico); volumen de muestra, 200 mL; pH de la muestra, 8 y flujo de paso, 10 mL/min. Para la elución se emplearon 2 mL de metanol a un flujo de1 mL/min.

Para la separación cromatográfica se usó una columna Waters Sunfire C18 3.0 × 100 mm (3,5 µm de tamaño se partícula) y una fase móvil compuesta por metanol y agua con 0,2 % (v/v) de acido fórmico y 5 mM de formiato amónico, a un flujo de 0,2 mL/min. El volumen de muestra inyectado fue de 10 µl en modo pick-up. Finalmente, para la determinación de los compuestos se empleó un sistema Varian 320-MS LC/MS/MS de triple cuadrupolo equipado con una interfase de ionización por electrospray (ESI). Una vez optimizadas las metodologías de extracción y determinación, los limites de detección obtenidos estuvieron en el rango 2,86-39,39 $ng \cdot L^{-1}$.

RESULTADOS

Las determinaciones realizadas en la primera campaña de campo se recogen en la Tabla 1, mientras que la Tabla 2 muestra los resultados obtenidos en las sucesivas campañas realizadas en los puntos de la red de control establecida.

En la figura 2 se representan las variaciones temporales de las concentraciones medidas en las aguas subterráneas analizadas en la red de control.

Tabla 1. Determinaciones de contaminantes emergentes en la campaña inicial llevada a cabo entre noviembre de 2008 y febrero de 2009.

	Nicotina ($ng \cdot L^{-1}$)	Atenolol ($ng \cdot L^{-1}$)	Metamizol ($ng \cdot L^{-1}$)	Paraxantina ($ng \cdot L^{-1}$)	Ibuprofeno ($ng \cdot L^{-1}$)	Cafeína ($ng \cdot L^{-1}$)	Fluoxetina ($ng \cdot L^{-1}$)
Agua de riego (aspersor)	132,6	208,7	nd	158,0	nd	116,11	126,73
Agua de riego (estanque)	102,0	57,0	nd	45,4	nd	38,14	35,67
Agua del suelo (lisímetro)	180,2	nd	nd	153,9	nd	166,96	28,83
G (11/2008)	68,7	6,9	nd	39,9	nd	21,83	nd
G (01/2009)	32,3	8,2	nd	11,8	nd	10,4	nd
S	71,5	34,8	nd	192,9	nd	36,7	21,5
P1	45,0	nd	nd	40,1	nd	29,9	nd
P2	36,7	nd	3,3	nd	nd	nd	nd
P3	23,2	nd	nd	nd	nd	19,6	nd
P4	nd	4,3	nd	13,5	nd	37,7	nd
P5	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
P6	43,5	23,6	nd	65,3	nd	3,3	nd
P7	73,9	nd	nd	33,9	nd	35,7	nd
P8	58,1	18,4	16,0	49,4	nd	26,4	47,2
P9	113,6	21,4	33,3	89,5	nd	14,1	34,1
P10	111,8	67,7	15,1	22,3	111,7	44,9	59,2
P11	108.7	9,1	nd	144,2	nd	38,3	nd
P12	40,8	nd	nd	nd	nd	nd	nd
P13	110,6	38,1	nd	146,6	nd	39,2	nd
P14	35,5	nd	nd	nd	nd	nd	nd

Tabla 2. Determinaciones de contaminantes emergentes en las campañas trimestrales llevadas a cabo durante el año 2009 en aguas de riego, agua del suelo y agua subterránea.

	Fecha	Nicotina ($ng \cdot L^{-1}$)	Atenolol ($ng \cdot L^{-1}$)	Metamizol ($ng \cdot L^{-1}$)	Paraxantina ($ng \cdot L^{-1}$)	Ibuprofeno ($ng \cdot L^{-1}$)	Cafeína ($ng \cdot L^{-1}$)	Fluoxetina ($ng \cdot L^{-1}$)
Agua de riego (aspersión)	nov/09	143,2	58,1	nd	108,3	nd	104,6	67,7
Agua del suelo (lisímetro)	mar/09	947,0	nd	nd	nd	nd	293,0	nd
	nov/09	1.344,1	nd	nd	52	nd	291,9	nd
G	mayo/09	64,0	1,7	nd	49,8	nd	148,1	nd
	abr/09	95,8	nd	nd	nd	nd	21,5	nd
	nov/09	143,2	11,2	nd	14,5	nd	115,5	nd
P3	abr/09	39.0	nd	nd	nd	nd	33,7	nd
	jul/09	27,9	nd	nd	nd	nd	101,7	nd
P4	abr/09	64,6	nd	nd	6,6	nd	53,6	nd
	jul/09	36,5	nd	nd	nd	nd	17,3	nd
	nov/09	54,1	8,6	nd	nd	nd	24,9	57,6
P5	abr/09	64,8	nd	nd	nd	nd	17,7	nd
	jul/09	49,7	2,8	nd	15,9	nd	41,4	nd
	nov/09	47,4	nd	nd	nd	nd	102,9	nd
P6	abr/09	55,6	nd	nd	nd	nd	30,9	nd
	jul/09	92,3	nd	nd	nd	nd	32,1	nd
	nov/09	58,5	nd	nd	nd	nd	22,0	52,6
P8	abr/09	71,6	5,0	nd	33,0	nd	76,4	nd
	jul/09	39,6	nd	nd	nd	nd	19,6	nd
	nov/09	59,2	nd	nd	15,1	nd	73,3	nd

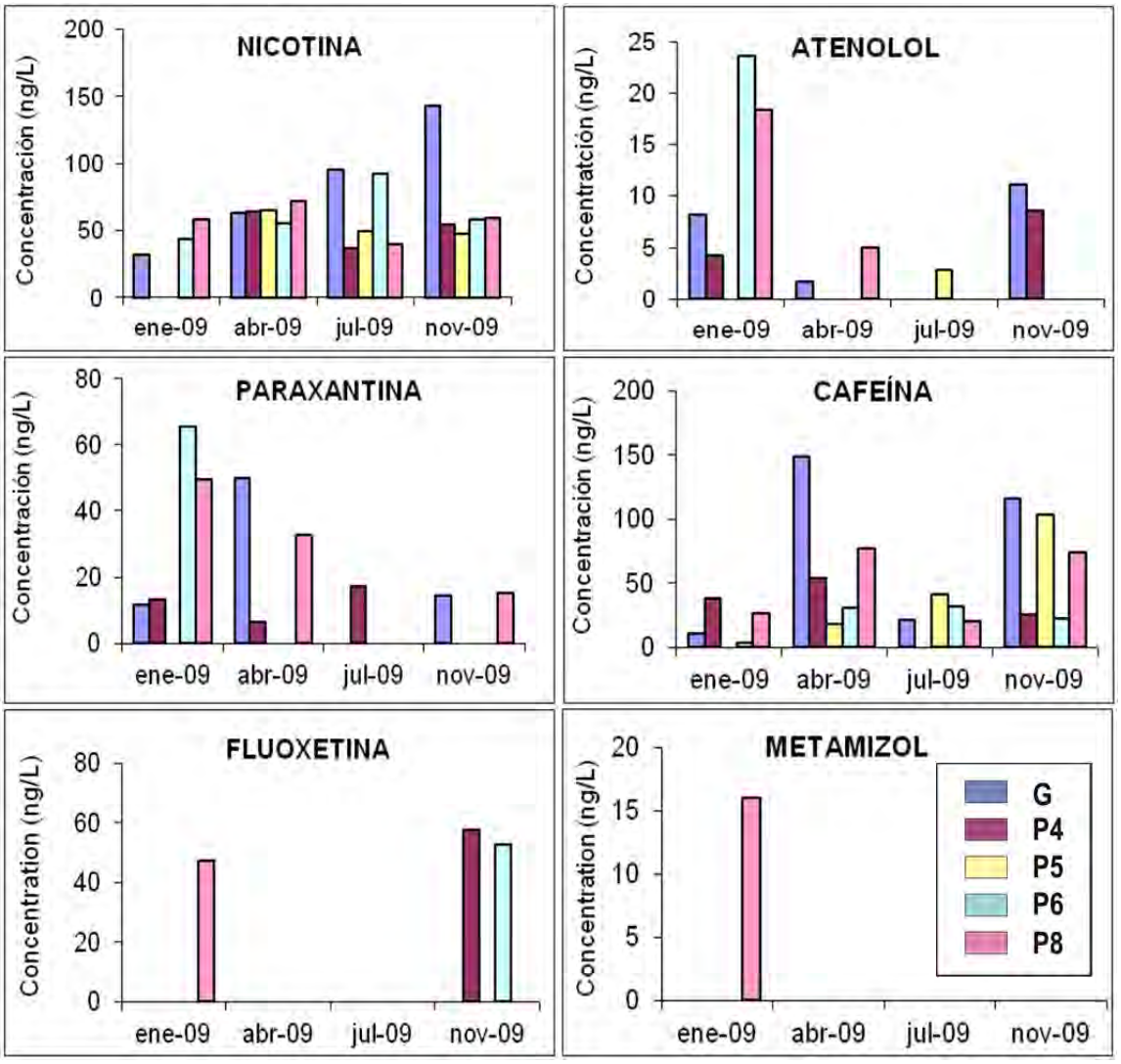


Figura 2. Representación gráfica de las determinaciones realizadas en los análisis trimestrales de los puntos de agua subterránea de la red de control.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El método analítico optimizado, basado en la extracción en fase sólida seguido por cromatografía líquida de alta resolución con espectrometría de masas en tándem (SPE-HPLC- MS/MS) proporcionó una adecuada selectividad y una sensibilidad suficiente para determinar los distintos compuestos estudiados a los niveles de concentración requeridos en matrices ambientales. Esta metodología constituye una herramienta reproducible, sencilla y rápida para análisis de rutina.

Las concentraciones detectadas fueron generalmente inferiores a los 100 ng/L, umbral establecido según la normativa europea de contaminación de pesticidas en aguas subterráneas (2006/118/CE). Cafeína y nicotina fueron los compuestos más ubicuos, lo que ratifica su alto y variado consumo. El agua de riego muestreada en un aspersor del campo de golf y en el estanque donde se almacena el agua de riego presentaron las mayores concentraciones de los compuestos analizados, exceptuando el ibuprofeno y el metamizol, que no están presentes en ninguna de las muestras de la red de control. Una alta tasa de evaporación en el estanque y/o fenómenos de degradación y adsorción a

través de la zona no saturada, podrían explicar este resultado. El agua del suelo muestreado en el lisímetro presenta concentraciones similares al agua de riego en la primera campaña, aunque las concentraciones en nicotina y cafeína aumentan considerablemente en las determinaciones de marzo y noviembre de 2009. En el primer muestreo de aguas subterráneas, que incluyó un número amplio de puntos, se detectaron prácticamente todos los analitos estudiados, la mayoría de ellos de una manera constante en tiempo y espacio y presentando concentraciones de hasta 193 $ng \cdot L^{-1}$. Los contenidos de los pozos del Barranco de Las Goteras aumentan en la dirección del flujo del agua subterránea, según el acuífero se va enriqueciendo en aguas procedentes de posibles fuentes contaminantes. Así, los pozos P9 y P10 presentan las concentraciones más altas en el muestreo completo. No se eligieron estos pozos para la red de control porque se consideró que no eran representativos de la posible contaminación por los retornos de riego del campo de golf, objeto del estudio. El pozo P10 es el único que presenta una concentración alta de ibuprofeno (111 $ng \cdot L^{-1}$). Este compuesto tiene una alta capacidad de adsorción en suelos volcánicos de características ándicas (Estévez et al., 2014), por lo que su presencia debe ser indicativa de que en esta área el acuífero recibe agua de algún pozo negro.

No es posible establecer el origen de la contaminación a partir de los resultados previos obtenidos en este estudio, aunque parece claro que el acuífero integra aguas procedentes de varios posibles orígenes además del riego con aguas regeneradas en el campo de golf, como las fosas sépticas situadas a lo largo del barranco, las roturas en la red de saneamiento y los retornos de riego con aguas regeneradas en pequeñas explotaciones agrícolas de la zona.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se enmarca en el Programa CONSOLIDER-TRAGUA (CSD2006-00044) y el proyecto REDESAC (CGL2009-12910-C03-02). Se agradece su apoyo al Real Club de Golf de Las Palmas y a los propietarios de los pozos y la galería.

REFERENCIAS

Afonso-Olivares, C.; Torres-Padrón, M.E.; Sosa-Ferrera; Z. y Santana- Rodríguez, J.J. 2013. *Assessment of the presence of pharmaceutical compounds in seawater samples from coastal area of Gran Canaria island Spain).* Antibiotics, 2, 274-287

Casas, A.; Tapias, J.; de Bustamante, I.; Iglesias, J.A.; de Miguel, A.; Lillo, J.; Leal, M.; Candela, L.; Cabrera, M.C.; Palacios-Díaz, P.; Salas, J.J.; Martín, I. y Mas, J. 2011. *Guía metodológica para el uso de aguas regeneradas en riego y recarga de acuíferos*. Ed. CONSOLIDER-TRAGUA, Madrid.

Estévez, E.; Cabrera, MC.; Molina-Díaz, A.; Robles-Molina, J. y Palacios-Díaz, MP. 2012. *Screening of emerging contaminants and priority substances (2008/105/EC) in reclaimed water for irrigation and groundwater in a volcanic aquifer (Gran Canaria, Canary Islands, Spain)*. Sci.Total Environ., 433: 538-546.

Estévez, E.; Palacios-Díaz, M.P.; Molina-Díaz, A.; Robles-Molina, J. y Cabrera, M.C. 2013. *Los contaminantes emergentes en las aguas subterráneas: el caso del NE de Gran Canaria*. En N. González, E. E. Kruse; M.M Trovatto, y P. Laurencena (eds.): Temas actuales de la Hidrología Subterránea, AIH-Grupo Argentino, 247-254.

Estévez, E.; Hernández-Moreno, J.M.; Fernández-Vera, J.R. y Palacios-Díaz, M.P. 2014. Ibuprofen adsorption in four agricultural volcanic soils. Sci.Total Environ., 468-469, 406-414.

Lapworth, D.J.; Baran, N.; Stuart, M.E. y Ward, R.S. 2012. Emerging organic contaminants in groundwater: A review of sources, fate and occurrence. Environmental Pollution, 163: 287-303.

ISBN: 978-84-938046-4-0

LA INCIDENCIA DEL VERTIDO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DE LAS INSTALACIONES DEL INSTITUTO ASTROFÍSICO DE CANARIAS EN EL ROQUE DE LOS MUCHACHOS (LA PALMA, CANARIAS) SOBRE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS. MÉTODO DE ESTUDIO Y RESULTADOS

Raquel MORALES GARCÍA[1], Sergio MARTOS-ROSILLO[1], Alfredo GARCÍA DE DOMINGO[1], Loreto FERNÁNDEZ RUIZ[1] y Juan José DURÁN VALSERO[1]

[1] Instituto Geológico y Minero de España (IGME). C/ Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid, España.
r.morales@igme.es; s.martos@igme.es; a.garcia@igme.es; ml.fernandez@igme.es; jj.duran@igme.es

RESUMEN

Para obtener la autorización administrativa de las doce instalaciones de depuración y vertido de aguas residuales domésticas de las instalaciones ubicadas en el Roque de Los Muchachos, el Consejo Insular de Aguas de La Palma requiere al Instituto Astrofísico de Canarias (IAC) la realización de un estudio hidrogeológico que cumpla con los requisitos contenidos en el Reglamento de Control de Vertidos para la Protección del Dominio Público Hidráulico. Este estudio, realizado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), se concreta, por un lado, en la definición de la naturaleza y volumen del vertido; y por otro, en la caracterización del medio físico (fisiografía, geología, hidrología superficial e hidrogeología), el inventario de puntos de agua, las características piezométricas y de flujo subterráneo, la cartografía geológica de detalle del área de estudio, la calidad actual de las aguas subterráneas y la caracterización hidrogeológica de la formación receptora. Todos los estudios se han apoyado en trabajos de campo y gabinete así como en ensayos y análisis de laboratorio. Tras el análisis detallado de los resultados, se han establecido y justificado los criterios para establecer la inocuidad del vertido de las aguas residuales domésticas a las aguas subterráneas.

Palabras clave: *aguas residuales, aguas subterráneas, hidrogeología volcánica, La Palma, vertidos*

ABSTRACT

Required to obtain the administrative authorisation of the twelve facilities for treatment and disposal of domestic sewage of the facilities located at the Roque de Los Muchachos, the Insular Council of waters of La Palma to the Canary Islands Astrophysics Institute (IAC) a hydrogeological study that complies with the requirements contained in the regulation of the Control of discharges for the protection of the public hydraulic domain. This study, conducted by the Institute of Geological and Mining of Spain (IGME), focuses on the one hand, on the definition of the nature and volume of the spill; and secondly, in the characterization of the environment (topography, geology, surface hydrology and hydrogeology) physicist, the inventory of points of water, the piezometric features and subsurface flow, geological mapping in detail of the study area, the quality of groundwater and hydrogeological

characterization of receiving training. All studies have supported in field and office work as well as trials and laboratory analysis. After the analysis, detailed results, have been established and justified criteria to establish the food safety of the discharge of domestic sewage into the groundwater.

Key words: *groundwater, La Palma island, volcanic hydrogeology, waste discharges, wastewater*

SITUACIÓN GEOGRÁFICA

La isla de La Palma está situada en el extremo noroccidental del Archipiélago Canario, a unos 500 km de la costa africana y a 1.440 km de la península Ibérica (Cádiz). Tiene forma de triángulo isósceles invertido, con una extensión superficial de 706 km^2 y dimensiones máximas de 47 km (de Norte a Sur) y 27 km (de Este a Oeste). La Caldera de Taburiente, declarada Parque Nacional de España, ocupa la parte centro-norte de la isla y constituye la característica fisiográfica más importante de la misma, con desniveles superiores a 1.500 m. La zona más elevada de este circo montañoso la constituye el Roque de los Muchachos con 2.426 m de altura. En esta zona se ubican las instalaciones del Observatorio del Roque de Los Muchachos (ORM), en el término municipal de Garafía, pertenecientes al Instituto Astrofísico de Canarias (IAC).

ANTECEDENTES Y MÉTODO DE ESTUDIO

Con fecha 24 de julio de 2013 el Consejo Insular de Aguas de La Palma, en relación a la autorización administrativa para la legalización de las doce instalaciones de depuración y vertido de aguas residuales domésticas procedentes de las instalaciones ubicadas en el Roque de los Muchachos, notifica (mediante resolución) al Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), la concesión de dicha autorización administrativa con carácter condicionado a la presentación de una serie de documentos, entre los que destaca la actualización y ampliación del estudio hidrogeológico presentado en el año 2001. La resolución especifica que el estudio hidrogeológico complementario debe dar respuesta a los requerimientos del apartado 1 del artículo 15 del Decreto 174/1994 de 29 de julio por el que se aprueba el Reglamento de Control de Vertidos para la Protección del Dominio Público Hidráulico, que se corresponden con una indicada caracterización hidrogeológica.

Con el fin de dar cumplimiento a este requerimiento, el IAC se pone en contacto con el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Organismo Público de Investigación adscrito actualmente al Ministerio de Economía y Competitividad, y le solicita la caracterización hidrogeológica del emplazamiento del Observatorio del Roque de Los Muchachos. El estudio finaliza en diciembre de 2013 con la redacción del documento: Estudio hidrogeológico relativo a la inocuidad del vertido de aguas residuales depuradas de las instalaciones del Instituto Astrofísico de Canarias, en el Roque de Los Muchachos (Garafía, La Palma, Canarias) (IGME, 2013), que se incorpora al expediente administrativo para la tramitación de la autorización.

En este estudio, para determinar la incidencia del vertido del Observatorio del Roque de Los Muchachos sobre las aguas subterráneas, se ha procedido a la caracterización, primero, del vertido, y luego a la caracterización del medio receptor del vertido, incidiendo en la caracterización hidrogeológica local y en el establecimiento del modelo de flujo subterráneo bajo el observatorio, con la realización de trabajos de campo y análisis específicos. Analizando estos factores se puede determinar la afección del vertido y establecer de este modo los criterios que afectan o justifican la inocuidad del mismo.

CARACTERIZACIÓN DE LA ACTIVIDAD GENERADORA DEL VERTIDO

Las instalaciones que generan las aguas residuales domésticas se sitúan en el Observatorio del Roque de Los Muchachos y se corresponden con 10 telescopios, una residencia y un establecimiento de servicios generales. El Observatorio carece de red de abastecimiento de agua potable, que se realiza por medio de cubas procedentes de las galerías de Las Goteras y Minaderos. Respecto al saneamiento, las aguas residuales domésticas generadas se tratan de forma individual mediante sistemas de depuración convencional y se vierten posteriormente al terreno, por lo que existen 12 depuradoras (EDAR) de pequeña escala, con su correspondiente vertido, ubicadas próximas a las instalaciones (Figura 1). El tratamiento, caudal máximo de vertido y sistema de vertido de cada EDAR se resume en la Tabla 1, donde destacan los pequeños caudales generados que suponen un volumen de vertido anual total de 4.719, 6 m^3/año.

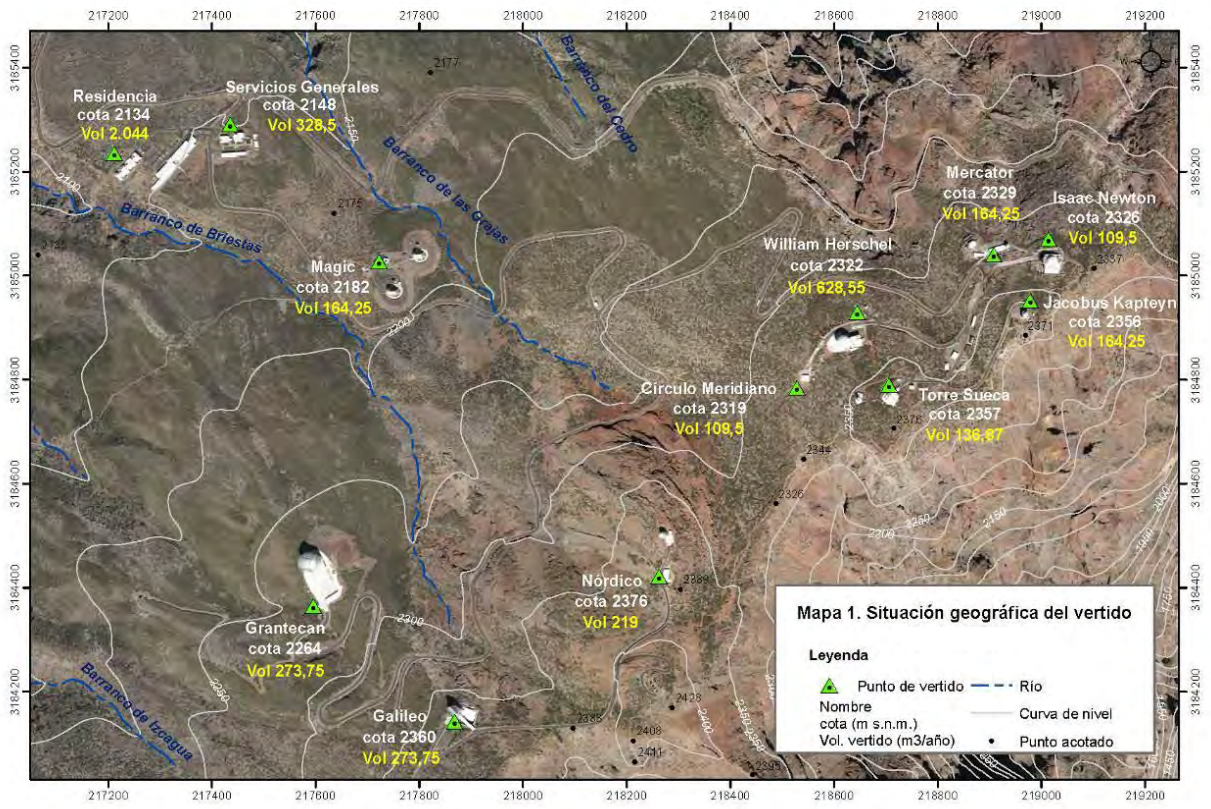


Figura 1. Situación geográfica de las instalaciones del Observatorio del Roque de Los Muchachos y los puntos de vertido de aguas residuales domésticas de las EDAR.

Respecto a la calidad del efluente de cada EDAR, el IAC realiza controles trimestrales y una caracterización anual que contempla el análisis de todos los parámetros indicados en el Decreto 174/1994. En general, se cumplen los valores de concentración máxima, aunque puntualmente se sobrepasan en algunas instalaciones los valores de *E-Coli*, DQO, DBO_5 y Sólidos Sedimentables.

De cara a valorar el potencial contaminante de estos vertidos resulta significativa la carga contaminante de los mismos. Esta carga contaminante resultará muy pequeña, dado que se evalúa como la concentración del parámetro medido por el caudal vertido que, como se indica anteriormente, es de escasa entidad. Cabe indicar al respecto que el recorrido máximo de los contaminantes biológicos en condiciones ordinarias varía entre 15 y 30 metros en medios saturados y puede reducirse a 3 metros en medios no saturados.

Tabla 1. Tratamiento de las aguas residuales domesticas en cada instalación.

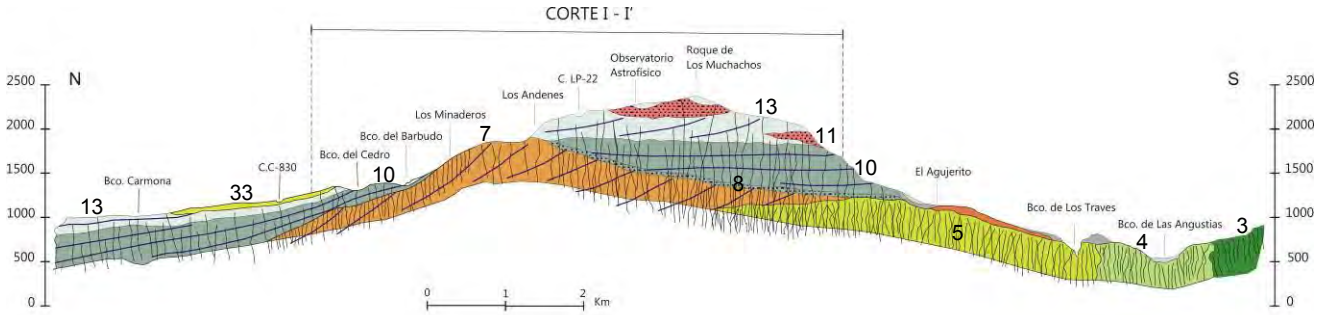
EDAR	Sistema de vertido	CAUDAL VERTIDO MAX. m^3/año	TRATAMIENTO
MERCATOR	Pozo negro	164,25	Filtro biológico Reja de desbaste, decantación-digestión, cámara de grasas
MAGIC	Pozo negro con registro	164,25	Filtro biológico. Reja de desbaste, decantación-digestión, cámara de grasas
NAZIONALE GALILEO	Red drenante con zanja. Tubería en forma de espina	273,75	Aerobio. .Cámara de grasas, fosa séptica y sistema de depuración con aireador, clarificador/decantador. Recirculación de fangos
GRANTECAN (GTC)	Tubería en superficie, sobre el terreno	273,75	Aerobio. Separador de grasas y arenas, depuración aeróbica, con aporte de oxígeno .Decantador de fangos, aireador, decantador/clarificador
TORRE SUECA	Tubería hincada, se filtra en el terreno. Tubería enterrada en su totalidad	136,875	Aerobio. Depuración aeróbica con aporte de oxígeno activo. Hay separación de grasas por diferencias de densidad, clarificador y recirculación de fangos
RESIDENCIA	Tubería hincada, se filtra en el terreno. Tubería enterrada en su totalidad	2044	Aerobio. Separador de grasas, reja de desbaste, con limpieza quincenal. Depuración aeróbica. Homogeneizador, con sistema de aireación con aporte continuo, Aireador y Decantador-Clarificador
NÓRDICO (NOT)	Tubería hincada, se filtra en el terreno. Tubería enterrada en su totalidad	219	Aerobio. Reja de desbaste. Depuración aeróbica. Aireador con oxidación prolongada y Decantador-Clarificador
WILLIAM HERSCHEL	Tubería hincada, se filtra en el terreno. Tubería enterrada en su totalidad	682,55	Aerobio. Reja de desbaste y separador de grasas. Depuración aeróbica. Aireador prolongada con aporte de oxígeno y Clarificador en el anillo perimetral
ISAAC NEWTON	Zanja filtrante de 20 metros	109,5	Aerobio. Reja de desbaste y separador de grasas. Depuración aeróbica. Aireador con oxidación prolongada Y Clarificador en el anillo perimetral
SERVICIOS GENERALES	Tubería hincada, se filtra en el terreno. Tubería enterrada en su totalidad	328,5	Aerobio. Reja de desbaste. Aireación prolongada con aporte de oxígeno indirecto y decantador de fangos donde también se separan grasas
JACOBUS KAPTEYN	Tubería hincada, se filtra en el terreno. Tubería enterrada en su totalidad (cuando funcionaba)	164,25	Aerobio. Reja de desbaste, en caso de uso esporádico los residuos se limpian cada 15 días. Depósito de almacenamiento de residuos, sin uso actual
CIRCULO MERIDIANO	Tubería hincada, se filtra en el terreno. Tubería enterrada en su totalidad (cuando funcionaba)	109,5	Aerobio. No genera residuos en la actualidad

CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO RECEPTOR DEL VERTIDO

Marco geológico e hidrogeológico del Roque de Los Muchachos

La historia geológica de La Palma se caracteriza por la existencia de dos etapas claramente definidas: submarina y subaérea. La primera configura un monte submarino que aflora en el interior de la Caldera de Taburiente. Sobre este monte (también denominado Complejo Basal), descansa en fuerte discordancia angular y erosiva el edificio volcánico subaéreo que, a su vez, está integrado por dos edificios principales: a) el escudo volcánico septentrional (Escudo Norte), más antiguo y de contorno circular, forma la parte norte de la isla y el Roque de los Muchachos y en él se diferencian el edificio volcánico de Garafía y el edificio volcánico de Taburiente; y b) el rift activo (Dorsal de Cumbre Vieja), más meridional y reciente, que se extiende hacia el sur de la isla. En este contexto, el Observatorio del Roque de Los Muchachos se localiza sobre el edificio volcánico de Taburiente (Figura 2).

Desde el punto de vista hidrogeológico, el observatorio se sitúa sobre el principal acuífero de la isla, el Acuífero Insular de las Vertientes (Masa de Agua Subterránea LP001). El muro del acuífero, que aflora en la Caldera de Taburiente, lo define el Acuífero del Complejo Basal (MAS LP003) formado por materiales de muy baja permeabilidad del Edificio Submarino. De muro a techo, el acuífero está integrado por los materiales de los edificios volcánicos de Garafía y Taburiente (inferior y superior), cuyo espesor puede llegar a superar los 1.000 m (Figura 2). Respecto al flujo subterráneo, este sigue una disposición radial divergente, desde el límite con la Caldera de Taburiente hacia el mar. Destaca la notable altitud que alcanza la superficie piezométrica en el sector central del acuífero, donde se dibujan isopiezas de hasta 1.750 m s.n.m (SPA-15, 1975), coincidiendo con la zona del Roque de Los Muchachos.



LEYENDA. FORMACIONES SEDIMENTARIAS: (33) Formación La Mata, depósitos de ladera y lahares. EDIFICIO TABURIENTE SUPERIOR: (13) Coladas basálticas. (11) Piroclastos basálticos. EDIFICIO TABURIENTE INFERIOR: (10) Coladas basálticas. (8) Aglomerados. EDIFICIO GARAFÍA: (7) Lavas y piroclastos basálticos. EDIFICIO SUBMARINO: (5) Gabros. (4) Domos o coladas traquíticas. (3) Lavas almohadilladas, brechas, metasomatizadas a rocas verdes.

Figura 2. Litología y disposición estructural de los edificios volcánicos que configuran el norte de la isla de La Palma.

Caracterización y funcionamiento hidrogeológico en la zona del vertido

Para determinar el funcionamiento hidrogeológico concreto del área de estudio se han realizado los siguientes trabajos de campo y ensayos:

a) Revisión y análisis del inventario de puntos acuíferos. En el entorno del observatorio se localizan un total de 14 galerías y 18 manantiales relevantes. Atendiendo a la cota y situación de los manantiales se identifica una circulación local y otra regional. Al norte del observatorio, surgen manantiales colgados a favor de contactos intraformacionales (almagres) a cota superior a los 2.000 m s.n.m. El nivel acuífero regional viene dado por los manantiales que emergen en el contacto entre el edificio Taburiente Inferior con el edificio Garafía (1.700 - 1.880 m s.n.m.). En este orden, asumiendo que la superficie piezómetrica bajo el observatorio se encuentra a 1.750 m s.n.m. y considerando la cota mínima y máxima a la que se encuentran los puntos de vertido, resulta un espesor de zona no saturada de entre 384 y 626 m. Por otro lado, el análisis de la evolución de los caudales drenados por las galerías permite comprobar la gran inercia y espesor de la zona no saturada del Acuífero de las Vertientes. Los hidrogramas analizados son prácticamente planos, sin picos notables que marquen rápidas crecidas de caudal en respuesta a las lluvias, lo que indica que no existe una rápida conexión entre el área de recarga y la zona saturada del acuífero.

b) Cartografía geológica a escala 1/10.000. Con objeto de afinar el modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico, el reconocimiento de campo se ha centrado en las formaciones del edificio Taburiente superior que subyacen bajo los telescopios del Observatorio: piroclastos basáticos y coladas basálticas, lo cual ha permitido elaborar un mapa geológico de detalle (Figura 3) y su corte geológico (Figura 4), donde se observa que el nivel de arcillas incluido en los piroclastos basálticos, posee un sentido hidrogeológico preciso ya que constituye un nivel impermeable que permite la surgencia de aguas subterráneas incluidas en pequeños acuíferos colgados.

c) Caracterización hidrogeológica de los materiales mediante ensayos de permeabilidad y porosidad efectuados en laboratorio. Se recogieron cuatro muestras de roca, tres correspondientes a basaltos, situados en los telescopios de Círculo Meridiano, Grantecan y en la Residencia; y una correspondiente a piroclastos del telescopio Nórdico (Figura 3). Los resultados muestran valores normales de porosidad pero una permeabilidad muy reducida, situada en el campo de los medios de baja permeabilidad (10^{-9} m/s), lo supone (considerando gradiente hidráulico unitario) una velocidad de tránsito vertical en la zona no saturada de entre 4,77 x 10^{-5} m/día y 0,08 m/día y un tiempo de tránsito para superar la zona no saturada existente bajo la zona de vertido, de entre 4,84 x 10^{3} días y 1,31 x 10^{7} días.

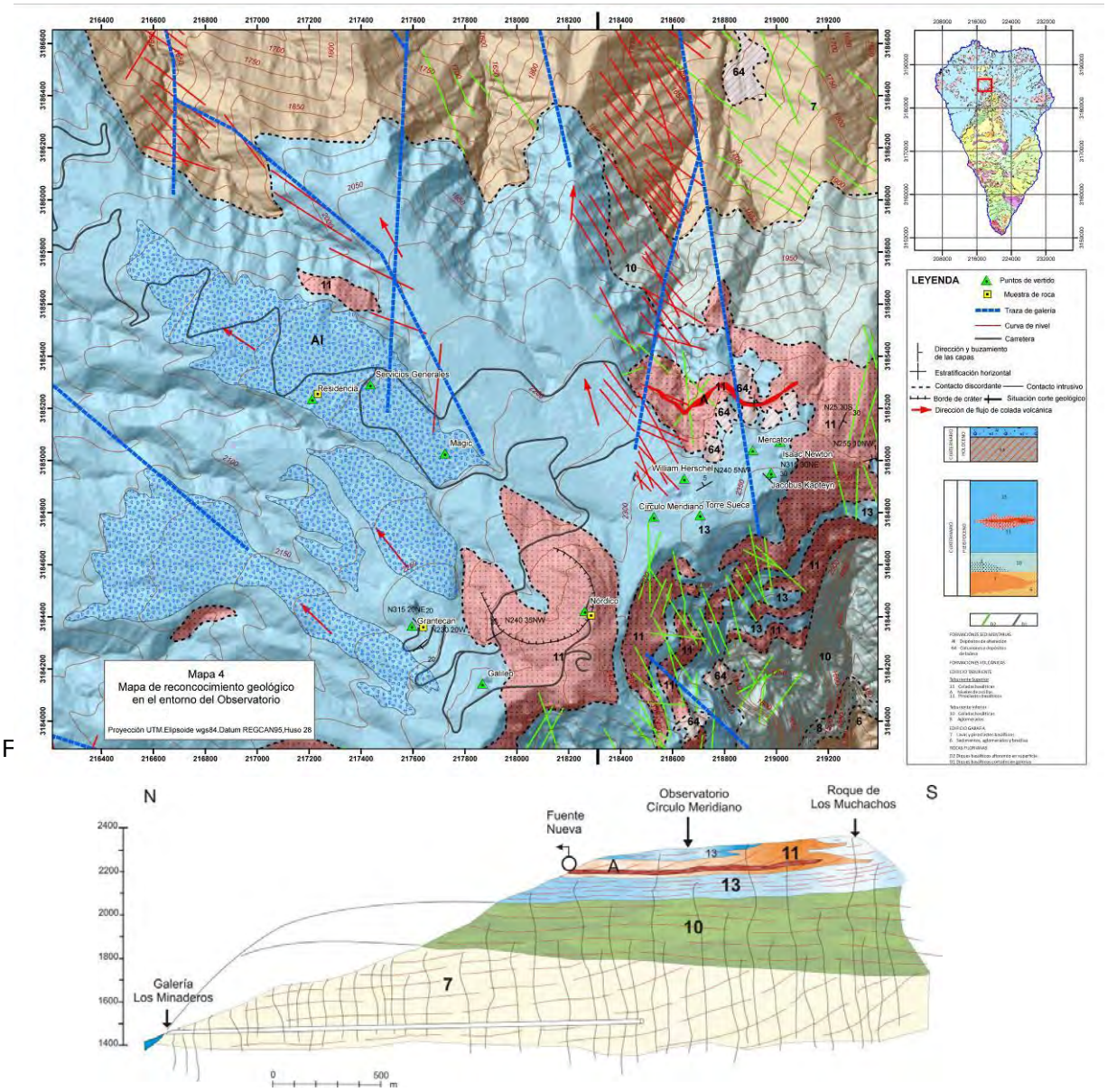


Figura 4. Corte geológico N-S en el Observatorio Circulo Meridiano con interpretación hidrogeológica.

d) Caracterización química e isotópica de las aguas. Para comprobar si existe afección de algún modo por el vertido, se procedió a la toma de siete muestras en diferentes galerías activas y a su análisis químico, isotópico y microbiológico. Se trata de aguas poco mineralizadas, con una conductividad eléctrica media de 87 µS/cm. Presentan reducidas concentraciones de nitratos y ausencia de nitritos y amonio, lo que descarta la posible afección por compuestos nitrogenados, estando todos los elementos analizados en concentraciones admisibles para su consumo humano según el RD 140/2003. Los valores isotópicos de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$, en relación con la recta meteórica mundial (Craig, 1957) y la recta meteórica local (Poncela y Skupien, 2008), muestran aguas procedentes de la infiltración del agua de lluvia local, poco evolucionadas y con cierto empobrecimiento en isótopos pesados. De acuerdo con la recta actitudinal calculada para la isla de La Palma (Vegeer, 1991, Poncela y Skupien, 2008) se deduce que la principal área de recarga de las galerías muestreadas queda comprendida entre 1.760-2.040 m s.n.m. y que las aguas de las galerías son aguas procedentes de la infiltración el agua de lluvia y poco evolucionadas a su paso por la zona no saturada del acuífero.

La interpretación conjunta de toda la información geológica e hidrogeológica previa, junto

con el trabajo de campo y laboratorio presentado permiten establecer un modelo coherente de funcionamiento hidrogeológico. Un vertido en esta zona sufriría en primer lugar una elevada evapotranspiración. El agua restante circularía luego de forma subsuperficial por los planos de alteración y capas arcillosas, emergiendo por manantiales colgados sin llegar a alcanzar la zona saturada del acuífero regional. En el caso hipotético de que llegara, tendría que atravesar de forma lenta, como mínimo, entre 385 y 625 m de zona no saturada, espesor y tiempo suficiente como para que desaparezca el poder contaminante del vertido.

ANÁLISIS DE RESULTADOS: CRITERIOS QUE JUSTIFICAN LA INOCUIDAD DEL VERTIDO

Los criterios que justifican o afectan a la inocuidad del vertido de las instalaciones del Roque de los Muchachos y garantizan la adecuada protección de las aguas subterráneas, pueden agruparse en criterios geológicos, hidrogeológicos, hidrodinámicos e hidroquímicos.

a) Criterios geológicos. *Porosidad y permeabilidad de las litologías que constituyen el sustrato*. Una medida que garantiza la protección de las aguas subterráneas es la impermeabilidad del substrato sobre el que se asienta la actividad generadora del vertido. Los ensayos realizados indican que se trata de rocas de muy baja permeabilidad (10^{-9} m/s), suficiente para garantizar una adecuada protección de las aguas subterráneas en el substrato de los telescopios. *Geometría y disposición de los materiales*. La disposición estratigráfica de los depósitos volcánicos y la presencia de intercalaciones arcillosas impermeables incluidas en el edificio volcánico de Taburiente, dificulta la percolación directa y rápida de flujos verticales desde las instalaciones de superficie hasta la zona saturada. Por el contrario, la presencia de zonas de alteración superficiales y de intercalaciones de niveles más permeables (contactos intraformacionales entre coladas) favorece el desarrollo de flujos horizontales, que se manifiestan en los manantiales colgados existentes en la zona (Fuente Nueva y Fuente de Tamagantera).

b) Criterios hidrogeológicos. *Espesor de zona no saturada y capacidad de atenuación de contaminantes*. De acuerdo con el inventario de puntos acuíferos y el mapa de isopiezas del SPA-15 se puede estimar que bajo el observatorio existe, como mínimo, un importante espesor de zona no saturada, entre 385 a 625 m, que resulta suficiente para que la carga contaminante desaparezca por la acción de los procesos de degradación en el medio subterráneo. *Tiempo de tránsito*. Con los valores de permeabilidad saturada determinados, el tiempo de tránsito que necesitaría un contaminante para atravesar la zona no saturada bajo el vertido (entre $4{,}84 \times 10^3$ y $1{,}31 \times 10^7$ días) es más que suficiente para garantizar la no afección a las aguas subterráneas por vertidos en superficie de aguas residuales domésticas.

c) Criterios hidrodinámicos. *Evolución de los caudales drenados por las galerías*. Las galerías de Poleos Medio y Bajo, Fuente Nueva y Minaderos presentan hidrogramas planos, típicos de sistemas en los que la zona no saturada amortigua la variabilidad temporal de la recarga. Se está, por tanto, ante un acuífero muy inercial, con una potente zona no saturada, que ralentiza el descenso del agua de recarga hacia la zona saturada del acuífero y con una notable ausencia de vías preferenciales de flujo, dado que estas generarían picos de caudal destacados en los hidrogramas, que no han sido observados.

d) Criterios hidroquímicos. *Composición química y microbiológica.* El muestreo realizado en las galerías que por su localización podrían verse afectadas por el vertido, indica que las aguas subterráneas analizadas presentan una excelente calidad y no muestran ningún indicio de afección por el vertido, pese a que éste lleva produciéndose más de 20 años. *Composición isotópica*. Los resultados isotópicos de oxígeno y deuterio indican que se trata

de aguas procedentes de la infiltración del agua de lluvia local, poco evolucionadas. La altitud de recarga estimada apunta a que el área de recarga principal de las galerías muestreadas queda comprendida entre 1.760-2.040 m s.n.m.

CONCLUSIONES

El Observatorio del Roque de Los Muchachos se emplaza directamente sobre materiales del edificio volcánico de Taburiente superior, que forman parte del Acuífero Insular de las Vertientes (Masa de Agua Subterránea LP001). En la vertical del vertido se suceden apilamientos de lavas basálticas, escorias, aglomerados, piroclastos y brechas de los edificios volcánicos de Taburiente superior, Taburiente inferior y de Garafía, pudiendo el espesor del conjunto llegar a superar los 1.000 m. El vertido de aguas residuales domésticas depuradas en las Instalaciones del IAC en el Roque de Los Muchachos es de muy escasa entidad en cuanto a volumen y carga contaminante. Los criterios que afectan a la inocuidad del vertido (geológicos, hidrogeológicos, hidrodinámicos e hidroquímicos) y que permiten establecer un modelo coherente de funcionamiento hidrogeológico bajo el observatorio, garantizan la adecuada protección del acuífero, no constituyendo el vertido actual un riesgo potencial de afección a las aguas subterráneas.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Astrofísico de Canarias, por la financiación de los trabajos necesarios. Al Consejo Insular de Aguas de La Palma, por su colaboración y disposición en lo relativo a los procedimientos y la información previa.

REFERENCIAS

CIAP (2006). Informe sobre la caracterización hidroquímica e isotópica ambiental preliminar del acuífero asociado al túnel de trasvase. Funcionamiento hidrogeológico del sistema (Isla de la Palma). Consejo Insular de Aguas de La Palma.124 pp.

CIAP (2009). *Estudio General de la Demarcación Hidrográfica de la Palma.* Consejo Insular de Aguas de La Palma.105 pp.

IGME (2013). Estudio hidrogeológico relativo a la inocuidad del vertido de aguas residuales depuradas de las instalaciones del Instituto Astrofísico de Canarias, en el Roque de Los Muchachos (Garafía, La Palma, Canarias). 65 pp.

IGME (2008). Mapa Geológico en continuo escala 1/25.000 Isla de La Palma.

ITGE (1993). Estudio isotópico de las aguas subterráneas de la Isla de La Palma. Consultor: Geomecánica y Aguas, S.A e Instituto Tecnológico Geominero de España. Ministerio de Industria y Energía. 73 pp. Madrid.

Poncela, R. y Skupien, E. (2011). Características hidrogeológicas, químicas e isotópicas del agua subterránea del Acuífero Volcánico de las Vertientes en el entorno de los nacientes marcos y cordero (La Palma, Islas Canarias). El conocimiento de los recursos hídricos en Canarias cuatro décadas después del proyecto SPA-15. Homenaje póstumo al Dr. Ingeniero D. José Sáenz de Oiza. 87-92 pp. ISBN: 978-84-938046-0-2.

Skupien, E y Poncela, R. (2007). Contribución de los isótopos ambientales al conocimiento hidrogeológico del acuífero de Cumbre Nueva asociado al túnel de trasvase (Isla de La Palma). XII Congreso Internacional de Energía y Recursos Minerales. Oviedo, 7-11 de octubre. 13 pp.

SPA-15 (1975). Estudio científico de los recursos de agua en las Islas Canarias. SPA/69/515. Minist. Obr. Públ. Dir. Gral. Obr. Hidrául. UNESCO. Madrid-Las Palmas.

Veeger, A.I. (1991). Geochemical methods for evaluating the origin and evolution of ground water in volcanic rocks. Ph.D. Dissertation. University of Arizona. 239 pp.

ISBN: 978-84-938046-4-0

CUANTIFICACIÓN DE LA RECARGA NATURAL AL ACUÍFERO DEL NORTE DE GRAN CANARIA MEDIANTE EL BALANCE DIARIO DE AGUA EN EL SUELO

Gema NARANJO[1], María del Carmen CABRERA[1], Tatiana CRUZ-FUENTES[1], Luis Fernando MARTIN[2] y Emilio CUSTODIO[3]

[1] Dpto. de Física (GEOVOL), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Edificio de Ciencias Básicas, 35017 Tafira Baja. Las Palmas de Gran Canaria. España. gnaranjo@proyinves.ulpgc.es; mcarmen.cabrera@ulpgc.es; tcruz@proyinves.ulpgc.es
[2] Dpto. de Ingeniería Civil (GEOVOL), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Edificio de Ingenierías, 35017 Tafira Baja. Las Palmas de Gran Canaria. España. lmartin@dic.ulpgc.es
[3] Dpto. de Ingeniería del Terreno y Cartográfica. Universidad Politécnica de Cataluña (UPC). Jordi Girona 1-3, 08034 Barcelona. España. emilio.custodio@upc.edu

RESUMEN

La recarga al acuífero noreste de Gran Canaria ha sido calculada dentro del proyecto REDESAC mediante la realización de un balance diario de agua en el suelo. Para llevarlo a cabo ha sido necesario adaptar los datos de partida existentes referentes a la pluviometría, la evapotranspiración (ET_0 y ETP) y los parámetros del suelo. La zona se ha dividido en subzonas según la situación de las estaciones pluviométricas y atendiendo a las características climáticas. Los cálculos realizados mediante la utilización del código Easy-Bal han arrojado una recarga de unos 15±4 hm^3/a, lo que supone el 13±4% de la precipitación, la mayor parte de la misma concentrada en las zonas altas y de medianías.

Palabras clave: *Recarga, balance de agua en el suelo, acuífero volcánico, Gran Canaria.*

ABSTRACT

Groundwater recharge calculation was carried out within the REDESAC project by performing a daily water balance in the soil in the northeast aquifer of Gran Canaria. Existing data concerning to rainfall, evapotranspiration (ET_0 and PET) and soil parameters had to be adapted. The area was divided into subzones according to the situation of the rainfall stations and to climatic characteristics. Calculations made using the Easy-Bal code give a recharge of about 15±4 hm^3/y, which represents 13±4% of precipitation, most of it concentrated in the high and medium areas.

Key words: *Recharge, soil water balance, volcanic aquifer, Gran Canaria.*

INTRODUCCIÓN

La recarga de un acuífero es un fenómeno natural muy complejo, con destacable variabilidad espacial y temporal y que entraña una notable incertidumbre. Dado que su cuantificación es crucial para una correcta conservación, explotación y gestión de las aguas subterráneas, hay que abordar su evaluación mediante diversas técnicas lo más

independientes entre sí como sea posible para, comparando los resultados, determinar la bondad de las estimaciones realizadas.

El Norte de Gran Canaria ha sido objeto de trabajos dentro del proyecto de investigación REDESAC debido a que es donde se produce la mayor recarga al acuífero insular. En la zona de estudio se ha llevado a cabo la estimación de la recarga utilizando el método del Balance de Cloruros de origen atmosférico, resultando una recarga media multianual estimada de 25,4±18 hm^3/año, o sea 22±16% de la precipitación (Naranjo et al., 2014) que se puede ajustar mejor con mayor tiempo de observaciones. Para contrastar esta estimación se ha realizado un balance diario de agua en el suelo en la misma zona, cuyos resultados se muestran en el presente trabajo.

CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se localiza en el sector noreste de la isla de Gran Canaria, tiene una superficie de 312 km^2 e incluye las zonas N3, N4 y parte de la zona N2 de la zonificación hidrológica de Gran Canaria (Figura 1). Los límites de dichas zonas coinciden con el mar y con las divisorias de las cuencas hidrográficas de barrancos principales. En superficie afloran los materiales más jóvenes y permeables, con suelos poco retentivos y vegetación de moderada densidad, lo que favorece la recarga. El clima en la zona es muy variable de costa a cumbre debido al gradiente altitudinal y la dirección predominante de los vientos alisios. La precipitación media anual varía anual entre 800 mm/a a cotas altas y 115 mm/a a cotas bajas, con una precipitación media ponderada para la zona de estudio de 389 mm/a. Las temperaturas máximas y mínimas medias anuales varían desde 14ºC en las zonas altas a 21ºC en la costa, con una temperatura media de 18ºC.

MARCO HIDROGEOLOGICO

Geológicamente la isla tiene su origen en un vulcanismo intraplaca de punto caliente. En la zona de estudio afloran fundamentalmente lavas e ignimbritas Pliocenas y Cuaternarias y sedimentos de la Formación Detrítica de Las Palmas de edad Miocena y Pliocena. La mayoría de los pozos de la zona explotan los materiales Pliocenos y los materiales fonolíticos-traquíticos Miocenos infrayacentes. El funcionamiento hidrogeológico de Gran Canaria se caracteriza por la existencia de un acuífero único insular, con una superficie piezométrica en forma de domo. La recarga natural se produce por infiltración de la lluvia en las zonas de cumbre y medianías, circulando preferentemente por los materiales volcánicos más recientes. La descarga se produce al mar y mediante las extracciones de pozos y galerías, que han mermado las descargas naturales intermedias por los manantiales (nacientes) que existían donde afloran materiales menos permeables o en valles profundos (MOP-UNESCO, 1975). En la zona de estudio el espesor de la zona no saturada vale en promedio 100 m, mayor en los interfluvios y menor en los barrancos.

METODOLOGÍA Y TRATAMIENTO DE LOS DATOS

Datos utilizados para los cálculos

El balance diario de agua en el suelo se ha realizado usando la hoja de cálculo Easy-Bal 3.0, elaborada por el Curso Internacional de Hidrología Subterránea, considerando la recarga natural en el periodo 1980 a 2013. Este programa simplificado requiere introducir los parámetros del suelo: espesor, capacidad de campo y punto de marchitez permanente y, partir de una situación dada de humedad inicial, (aunque este último dato no es relevante para largos tiempos de cálculo), la pluviometría diaria (mm) y el umbral de escorrentía (mm).

Los datos del suelo fueron estimados para las áreas consideradas a partir de 8 perfiles detallados de suelo (Sánchez, 1975), cuya situación espacial se muestra en la Figura 1. Los umbrales de escorrentía se calcularon a partir del Número de Curva (Cruz-Fuentes et al., 2014). La pluviometría diaria (mm) procede de once estaciones pluviométricas del Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria (CIAGC). La ET_0 diaria (evapotranspiración de referencia calculada por Penman-Monteith) procede de dos estaciones agroclimáticas de la red SIAR (Figura 1). Para el resto de las estacaiones, la falta de datos disponibles obliga a aplicar un método alternativo de estimación que utiliza las temperaturas medias, por lo que se calcula la ETP mediante Thornthwaite.

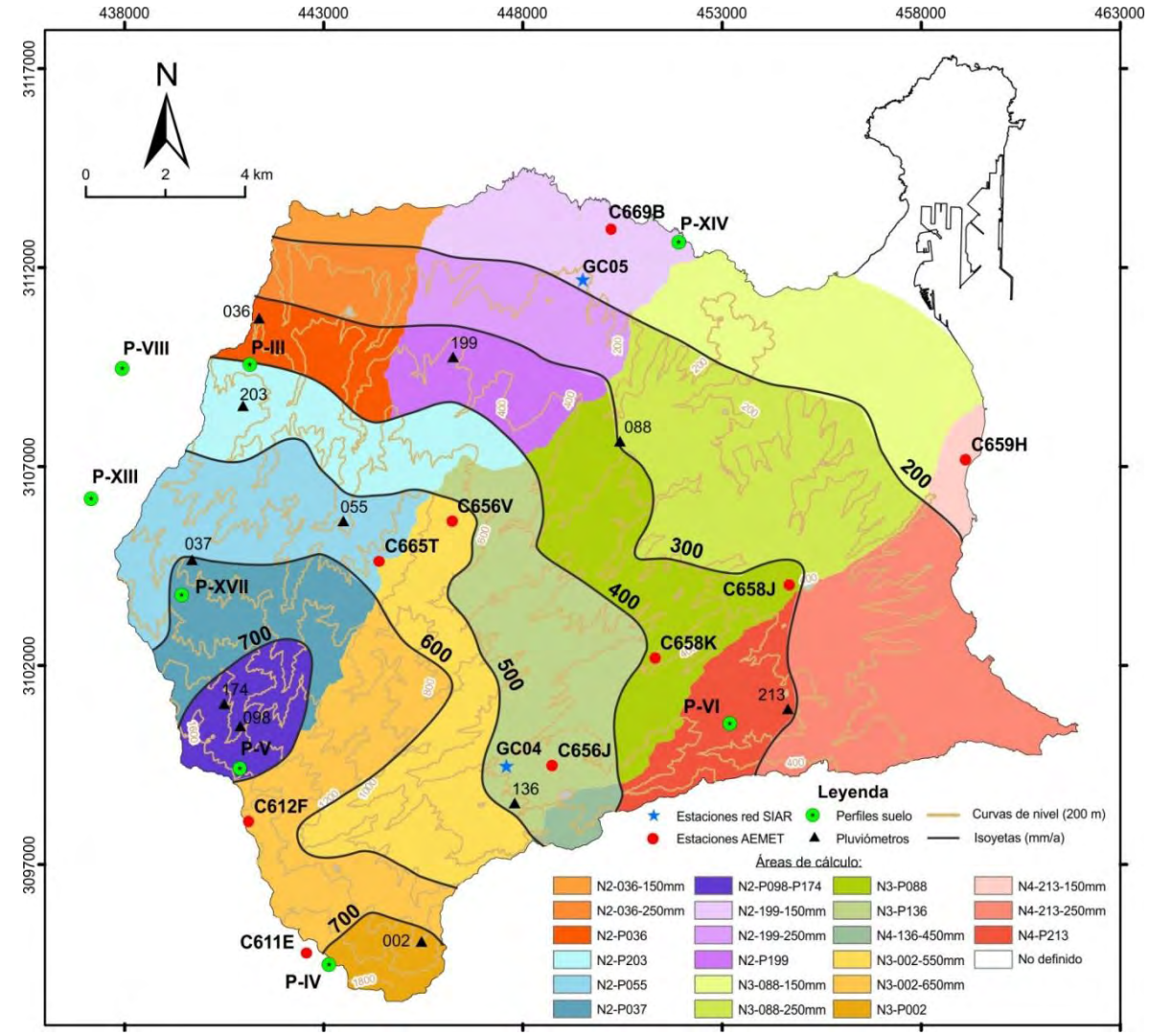


Figura 1.- Zona de estudio y localización de las estaciones pluviométricas, perfiles de suelo, estaciones climatológicas de AEMET, estaciones agroclimáticas red SIAR y áreas consideradas en el cálculo de la recarga.

La zona se dividió en áreas diferenciadas en base a la situación de los datos de partida (Figura 1). La extrapolación de los valores puntuales de las estaciones por zonas se realizó atendiendo fundamentalmente a las alturas de las estaciones y la situación de las isoyetas, debido a las características climáticas de la zona.

Evapotranspiración de referencia (ET_0)

La ET_0 diaria en las dos estaciones consideradas ha sido calculada con el método de

Penman-Monteith desde el año 2001 a 2013. Se dispone de entre un 80% y un 90% de los datos de ET_0 necesarios; el resto se completó con la media del mismo día en los otros años. Paralelamente se ha calculado la ETP por el método de Thornthwaite a partir de los datos diarios de temperatura en las 9 estaciones de AEMET existentes en la zona entre 1980 y 2013. El número de medidas de temperatura de los que se dispone oscilan entre unos 2000 y 11000 medidas (de 12012 medidas totales). Por ello, a partir de la estación con mayor número de medidas se completaron las series del resto mediante correlaciones bivariadas.

Finalmente, en el balance se utilizaron los datos de ETP generados para el periodo 1980-2013, transformando los datos obtenidos por Thornthwaite para las estaciones de AEMET con un factor de corrección calculado a partir de la correlación entre la ETP de Thornthwaite (estaciones AEMET) y la ET_0 de Penman-Monteith (estaciones SIAR), teniendo en cuenta la cercanía y climatología de ambos tipos de estaciones. Los valores mensuales de Thornthwaite se reparten homogéneamente en los días del mes correspondiente.

Parámetros del suelo

La capacidad de campo y el punto de marchitez permanente ponderales se calcularon a partir de los porcentajes de arcillas (Ac), limos (L) y arenas (Ar) de cada uno de los horizontes de los perfiles de suelo de que se dispone (Sánchez, 1975), según las siguientes expresiones tomadas de una adaptación de Saxton et al. (1986):

$$\text{CC (\% peso suelo seco)} = 0{,}48\cdot Ac + 0{,}162\cdot L + 0{,}023\cdot Ar + 2{,}62$$
$$\text{PMP (\% peso suelo seco)} = 0{,}302\cdot Ac + 0{,}102\cdot L + 0{,}0147\cdot Ar$$

A partir de estos cálculos y conociendo la densidad aparente de cada tipo de suelo, se han obtenido dichos parámetros por unidad de volumen, tomando un único valor representativo para cada perfil a partir de la media ponderada de los valores de los distintos horizontes, que se ha multiplicado por el espesor del suelo edáfico, para obtener esos parámetros en mm. Dado que la zona de estudio presenta irregularidades en cuanto al espesor de suelo (Sánchez, 1995), el valor medio de espesor de suelo para cada una de las áreas se ha calculado mediante un sistema de información geográfica.

RESULTADOS

La tabla 1 muestra los parámetros utilizados y los resultados obtenidos a partir del balance diario de agua en el suelo para cada una de las áreas establecidas (Figura 1). Extrapolando los resultados obtenidos del balance diario de agua en el suelo en cada área de cálculo (Tabla 2) a toda la zona de estudio se observa que la recarga obtenida asciende a unos 15,3 hm^3/a, lo que supone un 13% de la precipitación.

La incertidumbre en el cálculo del valor de la recarga media anual obtenida deriva de los errores de los datos de partida y de la de los parámetros del balance. Se ha estimado a partir de la varianza de la recarga (σ_R^2) obtenida llevando a cabo un análisis de sensibilidad a las variaciones de los parámetros que intervienen en el cálculo. Si $\delta R/\delta P_i$ representa la sensibilidad de la recarga a las variaciones del parámetro P_i y σ_{Pi}^2 la varianza del mismo, la varianza σ_R^2 viene dada por:

$$\sigma_R^2 = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial R}{\partial P_i} \sigma_{P_i} \right)^2$$

Tabla 1.- Recarga obtenida mediante el balance diario de agua en el suelo en el periodo 1980-2013 en cada una de las áreas consideradas. Parámetros de suelo empleados (espesor medio del

suelo, CC= capacidad de campo media y PM=Punto de marchitez medio obtenidos de cada perfil expresados en mm). P= Pluviometría media de cada estación; P_0=Umbral de escorrentía y Estación considerada para la ETP.

Estación CIAGC	Área de cálculo	Espesor (cm)	Área (km^2)	Perfil	CC (mm)	PM (mm)	P media (mm/a)	P_0 (mm)	Estación ETP	R (mm/a)	%R/P
002	N3-002-550mm	60	22,4	P-IV	0,25	0,13	690	29	C611E	171	25
	N3-002-650mm	56	21,2	P-IV	0,25	0,13	690	29	C611E	175	25
	N3-P002	44	4,5	P-IV	0,25	0,13	690	29	C611E	188	27
036	N2-036-150mm	55	3,3	P-III	0,49	0,29	252	22	C669B	0,2	0,1
	N2-036-250mm	34	6,6	P-III	0,49	0,29	252	22	C669B	11	4
	N2-P036	40	7,2	P-III	0,49	0,29	252	22	C656V	4	2
037	N2-P037	50	13,4	P-XVII	0,26	0,14	570	20	C665T	81	14
055	N2-P055	55	18,7	P-XIII	0,39	0,23	566	31	C665T	85	15
088	N3-088-150mm	37	23,2	P-XIV	0,43	0,25	293	14	C659H	0,1	0,02
	N3-088-250mm	48	31,5	P-VI	0,23	0,12	293	14	C658J	5	2
	N3-P088	42	22,8	P-VI	0,23	0,12	293	14	C658K	5	2
136	N3-P136	55	25,9	P-VI	0,23	0,12	484	30	C656J	79	16
	N4-136-450mm	40	2,1	P-VI	0,23	0,12	484	30	C656J	96	20
199	N2-199-150mm	66	12,5	P-XIV	0,43	0,25	362	22	C669B	2	0,5
	N2-199-250mm	56	10,3	P-III	0,49	0,29	362	22	C669B	2	0,5
	N2-P199	44	10,1	P-III	0,49	0,29	362	22	C656V	9	3
203	N2-P203	61	14,9	P-III	0,49	0,29	455	37	C656V	25	5
213	N4-213-150mm	38	2,6	P-XIV	0,43	0,25	317	16	C659H	1	0,3
	N4-213-250mm	43	27,6	P-VI	0,23	0,12	317	16	C658J	12	4
	N4-P213	55	10,3	P-VI	0,23	0,12	317	16	C658K	6	2
098-174	N2-P098-P174	37	8,2	P-V	0,24	0,13	727	23	C612F	203	28

Tabla 2.- Recarga media anual obtenida en la zona de estudio. S = superficie de las diferentes áreas. ETR media obtenida del balance diario de agua en el suelo. Áreas delimitadas por las isoyetas: baja < 400 mm/a; media entre 400 y 600 mm/a; alta > 600 mm/a.

Zona	AREA	S (km^2)	ETR (mm/a)	PRECIPITACION		RECARGA		$\%R/P_{total}$	$\%R/R_{total}$
				mm/a	hm^3/a	mm/a	hm^3/a		
N2	Baja	50	281	243	12	4	0,2	0,2	1
	Media	34	421	527	18	59	2	2	13
	Alta	22	379	654	14	131	3	3	19
	Total:	**105**			**44**		**5**	**5**	**33**
N3	Baja	77	232	233	18	3	0,3	0,2	2
	Media	48	346	518	25	106	5	4	33
	Alta	26	349	663	17	171	4	4	29
	Total:	**151**			**60**		**10**	**8**	**64**
N4	Baja	41	245	258	11	8	0,3	0,3	2
	Media	2	319	490	1	98	0,2	0,2	1
	Total:	**42**			**12**		**0,5**	**0,5**	**4**
TOTAL		**299**			**116**		**15**	**13**	**100**

Los parámetros a los que la recarga es especialmente sensible son la reserva útil de

agua en el suelo (R_u) de forma que a menor reserva útil máxima, la recarga y el umbral de escorrentía (P_0), son mayores, obteniéndose valores de recarga mayores a mayor umbral de escorrentía, quedando la fórmula de la incertidumbre de la siguiente forma:

$$\sigma_R^2 = \left(\frac{\partial R}{\partial R_u}\right)^2 \cdot \sigma_{R_u}^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial P_0}\right)^2 \cdot \sigma_{P_0}^2$$

La Tabla 3 muestra los cálculos de incertidumbre realizados en cada una de las áreas a partir del análisis de sensibilidad. De los mismos se desprende que la recarga es más sensible de forma general a las variaciones del umbral de escorrentía que a las variaciones de la reserva útil especialmente en las zonas altas, donde el rango de valores de recarga obtenido es considerablemente mayor que en el resto de las áreas. La recarga en la zona baja es igualmente sensible a ambos parámetros. La recarga en las zonas medias y altas es igualmente sensible a las variaciones de la reserva útil máxima mostrando aproximadamente el mismo rango de valores de recarga obtenidos.

Tabla 3.- Cálculo de la incertidumbre de la recarga en las diferentes zonas. El rango se toma como el valor medio ± 0,25. $\delta R/\delta P_i$ se calcula como la diferencia entre recarga máxima y mínima dividida por el valor del rango del parámetro. R_u=reserva útil media y P_0=umbral de escorrentía medio, como valores ponderados en cada zona. Sus errores se ha estimado a partir del conocimiento del área, adoptando como coeficientes de variación CV_{Ru}=0,21 (según CC, PM y espesor) y CV_{Po}=0,2.

Zona	Área	P_i (mm)	Valor medio (mm)	Rango (mm)	R_{min} - R_{max} mm/a	$(\delta R/\delta P_i)^2$ (a^{-2})	σ_{Pi}^2 (mm^2)	σ_R (mm/a)
N2	baja	R_u	97	73 - 122	2 - 9	0,02	597	4
		P_0	22	17 - 29	2 - 7	0,2	19	
	media	R_u	108	81 - 135	43 - 70	0,3	739	17
		P_0	34	25 - 42	39 - 64	2	46	
	alta	R_u	50	38 - 63	129 - 159	1,4	159	29
		P_0	21	16 - 27	106 - 168	35	18	
N3	baja	R_u	55	41 - 69	2 - 7	0,04	192	4
		P_0	14	11 - 18	1 - 7	0,7	8	
	media	R_u	65	49 - 81	110 - 141	0,9	265	25
		P_0	29	22 - 36	96 - 145	12	34	
	alta	R_u	58	43 - 72	168 - 199	1	208	31
		P_0	29	21 - 36	144 - 210	21	32	
N4	baja	R_u	59	44 - 74	4 - 11	0,1	219	5
		P_0	16	12 - 20	2 - 11	1	10	
	media	R_u	44	33 - 56	84 - 112	2	124	21
		P_0	30	22 - 37	74 - 111	6	36	

Áreas delimitadas por las isoyetas: baja < 400 mm/a; media, entre 400 y 600 mm/a; alta, > 600 mm/a.

Aplicando este método, el error medio estimado para la zona de estudio es de ±13,1 mm/a (±3,9 hm^3/a), un error aceptable para el valor de recarga medio obtenido (15,3 hm^3/a). En el futuro se deberán estudiar los valores de σ con datos experimentales y de calibración .

DISCUSIÓN

Los datos empleados en el balance de agua en el suelo arrastran numerosas incertidumbres. Hay que tener en cuenta que los datos referentes a las características del suelo proceden solamente de ocho perfiles (Figura 1). A partir de estos perfiles se han estimado los valores que se han introducido para calcular el balance por zonas, pero posiblemente los datos no sean extrapolables porque no existe una cartografía detallada de

suelos. Además, hay que destacar que la geología y topografía existente en la zona condiciona que existan amplias zonas sin ningún suelo desarrollado, por ejemplo en las laderas, por lo que esta extrapolación puede introducir un amplio error en los cálculos.

A la hora de calcular la ET_0 se optó por tomar los datos de las estaciones del SIAR calculadas por Penman-Monteith, ya que se utilizan valores diarios de temperatura y se tiene en cuenta la energía incidente en la superficie estudiada. Estos datos se utilizan para corregir las series de datos de Thornthwaite que utiliza medias mensuales (Jensen et al., 1990, Custodio et al. 1997). La distribución espacial de estas estaciones (Figura 1) puede no reflejar apropiadamente toda la zona, aunque se ha intentado minimizar el error tomando los valores según las alturas a que están situadas según la climatología del área.

Este método no ha sido calibrado debido a que se carece de series de datos suficientemente largas de variación de niveles piezométricos en la zona. Además, la potencia de la zona no saturada hace que la recarga tenga un considerable retraso y amortiguación respecto a la infiltración en el suelo, además que en parte se debe producir a través de discontinuidades (fisuras), que no son consideradas en el cálculo del balance.

En la Tabla 4 se muestra la relación entre la pluviometría y la recarga media anual estimada a partir del balance de agua en el suelo. Para la zonas bajas la relación es casi nula ya que se produce muy poca recarga, pero en las zonas medias y altas la dispersión existente en la relación recarga-pluviometría es típica de climas semi-áridos, por lo que no todas las recargas son proporcionales a la precipitación que las ha generado (Espinosa, 2014).

Tabla 4.- Relación de la pluviometría anual con la recarga producida. P pluviometría media anual. P_0 umbral de escorrentía medio. ETR evapotranspiración real media y R recarga media obtenida en el balance diario de agua en el suelo. Aquí no se han calculado los márgenes de error.

zona	Área	P (mm/a)	P_0 (mm)	ETR (mm/a)	R (mm/a)	Relación P vs. R
N2	baja	324	21,7	281	4 ± 1	R = 0,05·(P - 232)
	media	516	33,6	421	59 ± 4	R = 0,31·(P - 327)
	alta	630	20,9	379	131 ± 14	R = 0,4·(P - 312)
N3	baja	293	14,3	232	3 ± 2	R = 0,04·(P - 191)
	media	598	29,2	346	106 ± 9	R = 0,43·(P - 317)
	alta	690	28,5	349	171 ± 12	R = 0,45·(P - 295)
N4	baja	317	16,0	245	8 ± 2	R = 0,09·(P - 213)
	media	484	29,8	319	96 ± 7	R = 0,46·(P - 274)

$R=\alpha\cdot(P-P_0)$, siendo P= precipitación anual media (mm/a); R= recarga media anual (mm/a); P_0= precipitación umbral a partir de la cual se produce recarga; α = pendiente de la recta de regresión.

Para las zonas medias y altas, el umbral medio de pluviometría necesario para que exista recarga es de 274-327 mm/a.

CONCLUSIONES

La recarga obtenida para la zona de estudio mediante el balance de agua en el suelo es de 15±4 hm^3/a, lo que supone entre un 9% y un 17% de la precipitación. Espacialmente la recarga estimada se produce principalmente a cotas medias y altas (48% y 47% de la recarga total respectivamente), siendo muy pequeña en la zona de costa, donde no se supera los 0,8 hm^3/a (5% de la recarga total de la zona de estudio). En cuanto a las zonas

hidrológicas, casi el 65% de la recarga total se produce en la zona N3 que ocupa el 50% de la superficie de estudio, mientras que en la N4 se produce el 4% de la recarga de la zona de estudio. La incertidumbre derivada del análisis de sensibilidad de los parámetros empleados en el balance de agua en el suelo es mayor en las zonas altas y muestran una mayor sensibilidad al umbral de escorrentía. Esta primera evaluación sirve para contrastar los resultados obtenidos frente a los de la Planificación Hidrológica, donde se estima la recarga en un 19% de la precipitación (PHGC, 1999).

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se enmarca en el proyecto REDESAC (CGL2009-12910-C03-02) del Ministerio de Ciencia e Innovación. Los datos diarios de pluviometría fueron suministrados por el Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria. Los datos de temperatura diaria fueron cedidos por la Agencia Estatal de Meteorología. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

REFERENCIAS

Cruz-Fuentes, T., Naranjo, G., Cabrera, M.C., Custodio, E. (2014). *Estimación de la escorrentía superficial mediante la generación automática del número de curva con un SIG. Aplicación al norte de Gran Canaria (Islas Canarias, España)*. II Congreso Ibérico de las Aguas Subterráneas, CIAS2014. Valencia: 217-232.

Custodio, E., Llamas, M.R.; Samper, J. (1997). *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica.* Asociación Internacional de Hidrogeólogos, Grupo Español–Instituto Tecnológico Geominero de España: 1–455. ISBN: 84–7840–292–6

Espinosa, S. (2014). *Estimación de la recarga media anual de acuíferos: aplicación al Baix Ebre*. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 199pp + Anejos.

Jensen, M.E., Burman, R.D. and Allen, R.G. Ed.(1990). *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices No. 70, American Society of Civil Engineers. New York, 360 pp.

MOP-UNESCO (1975*). Estudio científico de los recursos de agua en las Islas Canarias (SPA/69/515).* Centro de Estudios Hidrográficos-Servicio Geológico de Obras Públicas. Las Palmas de Gran Canaria-Madrid.

Naranjo, G., Cruz-Fuentes, T., Cabrera, M.C., Martín, L.F., y Custodio, E. (2014). *Avances en la estimación de la recarga natural mediante la aplicación del método del balance de cloruros atmosféricos al acuífero del norte de Gran Canaria.* II Congreso Ibérico de las Aguas Subterráneas, CIAS2014. Valencia: 619-640

PLAN HIDROLÓGICO DE GRAN CANARIA (PHGC) (1999). Boletín Oficial de Canarias 73, 08/06/1999. Decreto 82/1999.

Sánchez, J. (1975). *Características y distribución de los suelos en la isla de Gran Canaria*. Tesis Doctoral, Universidad de La Laguna. 393 p.

Sánchez, J., Ríos, C., Pérez-Chacón, E. y Suárez, C. (1995). *Cartografía del potencial del medio natural de Gran Canaria*, Memorias y Planos, Cabildo Insular de Gran Canaria, Universitat de València, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 165 pp, + planos.

Saxton, K.E., Rawls, W.J., Romberger, J.S. y Papendick R. I. (1986). *Estimating generalized soil-water characteristics from texture*. Soil Science Society of America Journal, 50. pp. 1031-1036.

ISBN: 978-84-938046-4-0

CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA E ISOTÓPICA AMBIENTAL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS ALUMBRADAS EN LOS NACIENTES LA MINA Y EL MOLINILLO (T.M. DE TEJEDA, GRAN CANARIA)

Roberto PONCELA PONCELA[1], Elzbieta SKUPIEN BALON[1], Ángel MORALES GONZÁLEZ-MORO[2], Rafael J. LARIO-BÁSCONES[2] y Juan C. SANTAMARTA CEREZAL[3]

[1] Ejercicio Libre de la Profesión. c/Moreiba 2, 5ºB, 38111 Santa Cruz de Tenerife. rponcela_geo@yahoo, elzsku2006@yahoo.es
[2] Consejería de Empleo, Industria y Comercio. Gobierno de Canarias. Avda. Anaga 35, 38001 Santa Cruz de Tenerife. anmorgon@gobiernodecanarias.org, rlarbas@gobiernodecanarias.org
[3] Universidad de La Laguna, Área de Ingeniería Agroforestal. Tenerife. jcsanta@ull.es

RESUMEN

Se presenta la caracterización hidroquímica e isotópica ambiental de las aguas alumbradas en los nacientes denominados "La Mina" y "El Molinillo" (T.M. de Tejeda, Isla de Gran Canaria) a partir de datos analíticos físico-químicos de las muestras recogidas durante el periodo 2012-2014, y analizadas en laboratorios acreditados. Dichas aguas se corresponden con una tipología bicarbonatada cálcico-magnésica, presentando débil mineralización (oligometálica), con conductividad eléctrica del agua <150 µS/cm y con bajos contenidos en todos los iones analizados. La temperatura del agua en ambas captaciones está comprendida entre 13,7-14,9º C (aguas frías). Las características hidroquímicas de las aguas captadas en las nacientes se ha mantenido muy estable a lo largo del periodo de muestreo. Asimismo, la composición isotópica de las aguas subterráneas presenta, a su vez, una composición isotópica similar en δ^2H y en $\delta^{18}O$, destacando la presencia de tritio en concentraciones inferiores a 0,5 UT. Se concluye razonablemente que las aguas subterráneas de ambos nacientes son similares y homogéneas, y provienen del mismo sistema acuífero, si bien es probable que a través de vías de flujo diferentes y posiblemente interconectadas.

Palabras clave: *Tejeda, agua mineral natural, hidroquímica, isótopos ambientales.*

ABSTRACT

This paper describes the hydrochemical and environmental isotope mineral groundwater characterization from "La Mina" and "El Molinillo" springs (Tejeda, Gran Canaria Island), using physico-chemical analytical data from the monthly sampling campaign carried out from Jul 2012 to Aug 2013, which samples were analyzed in Accredited laboratories. These waters belong in the calcium-magnesium bicarbonate type and show both low mineralization and ions concentration, with an electrical conductivity under 150 µS/cm. Temperature in both catchments is ranging from 13,7ºC to 14,9ºC (cold waters). Hydrochemical behavior of these Natural Mineral Waters has been very stable during comparative period. In the same way, groundwater isotopic composition shows similar values in δ^2H and $\delta^{18}O$, with tritium concentration under 0,5 TU. These data lead to the reasonable conclusion that groundwater

in both springs is similar and homogenous and they come out from the same aquifer system, although its preferential flow paths may be different but possibly interconnected.

Key words: *Tejeda, natural mineral water, hydrochemistry, environmental isotopes.*

INTRODUCCIÓN

El Excmo. Ayuntamiento de Tejeda formuló la solicitud de declaración de Agua Mineral Natural (AMN) ante la Consejería de Empleo, Industria y Comercio del Gobierno de Canarias, en cumplimiento de los requerimientos que establece el Real Decreto 1798/2010, de 30 de diciembre, por el que se regula la explotación y comercialización de aguas minerales naturales y aguas de manantial envasadas para consumo humano.

Durante el periodo 2012-2014 se realizó todo el trámite técnico-administrativo, incluyendo los respectivos estudios geológicos e hidrogeológicos, así como el muestreo normativo mensual durante 12 meses para cada naciente de las aguas alumbradas (julio 2012-junio 2013 para La Mina y septiembre 2012-agosto 2013 para El Molinillo). En campo se determinaron la temperatura del aire, pH, conductividad eléctrica y temperatura del agua subterránea. En laboratorios acreditados de Las Palmas y de Barcelona se analizaron los parámetros físico-químicos, microbiológicos, parasitológicos e isotópicos ambientales.

En enero de 2014, la Consejería de Empleo, Industria y Comercio del Gobierno de Canarias emite las respectivas Órdenes donde se declara la condición de "Agua Mineral Natural" de las aguas alumbradas en ambos nacientes, de acuerdo con la Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas, y el Real Decreto 2857/1978, de 25 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento General para el Régimen de la Minería.

En esta comunicación se presenta la caracterización hidroquímica e isotópica ambiental de las aguas subterráneas de la zona central de Gran Canaria, aprovechando la base de datos generada para el reconocimiento de AMN de las aguas alumbradas en los nacientes mencionados, teniendo en cuenta, además, los datos recopilados de diversos Organismos: Ayuntamiento de Tejeda, Heredad de Las Palmas, Dragonal, Bucio y Briviesca, Heredad de El Molinillo y Consejo de Aguas de Gran Canaria.

SITUACIÓN GEOGRÁFICA Y MARCO GEOLÓGICO-HIDROGEOLÓGICO

La Isla de Gran Canaria, con una extensión de 1.560,1 km^2, es una de las siete islas principales del Archipiélago de las Islas Canarias, próximas al margen occidental del continente africano (Figura 1). La pluviometría promedio de la zona de estudio es P= 600-650 mm/año y la recarga promedio R= 250-270 mm/año (Skupien y Poncela, 2013a).

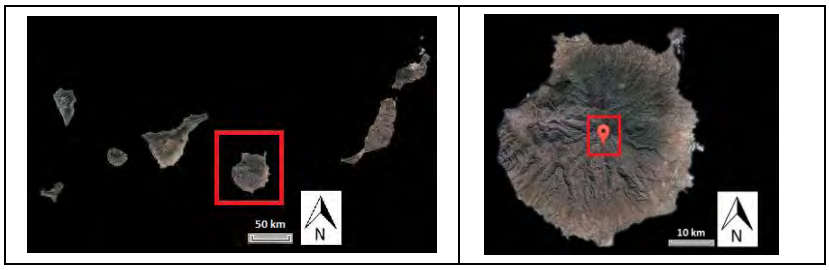


Figura 1.- Situación geográfica de la zona de estudio. Base cartográfica: SITCAN (Sistema de Información Territorial de Canarias) - GRAFCAN.

El archipiélago canario, situado en el Océano Atlántico y próximo al margen continental occidental africano, constituye la parte emergida de una formación volcánica emplazada sobre la litosfera oceánica, en el dominio intraplaca del borde occidental de la placa africana. Su génesis está asociada con la dinámica alpina, que tuvo su paroxismo en esta zona durante el Mioceno (hace unos 20 Ma) asociada, a su vez, a las tectonofases dinámicas del Atlas africano y desplazamiento del este hacia el oeste de un punto caliente ("hotspot") del manto, actualmente situado en el extremo occidental del archipiélago (Carracedo, 2011).

Gran Canaria es una isla geológicamente madura, con importantes rasgos erosivos postvolcánicos, que ha estado activa, al menos, durante los últimos 15-14 Ma (ITGE, 1992; GRAFCAN, 2011). La parte subaérea de la Isla es de construcción volcánica, con características propias de una isla oceánica. Su historia geológica data de unos 14 Ma (Mioceno Medio), desarrollándose hasta la actualidad diversas etapas constructivas caracterizadas por episodios o ciclos volcánicos que configuraron el relieve insular. Entre estos ciclos, se producían fases erosivas que destruían las estructuras volcánicas previamente originadas, lo que ha contribuido notablemente a la actual morfología visible.

Marco geológico e hidrogeológico

La zona de estudio, aunque situada en planta dentro de la masa de agua subterránea denominada ES7GC010.- Medianías Sur, de acuerdo con la Directiva Marco de Agua 200/60/CE, no tiene relación con ella ya que los niveles piezométricos promedio de esta masa están situados a cota 300 msnm (EGDHGC, 2009; CIAGC, 2013). Es por ello que los manantiales "La Mina" y "El Molinillo" están asociados a un sistema acuífero colgado o independiente entre las cotas 1.470 y 1.800 m, aproximadamente.

Ambos nacientes presentan una zona de surgencia asociada a un sistema de diques y a una unidad de lapillis y depósitos piroclásticos, localmente compactados y "almagrizados", de color rojizo a terroso. Por debajo de esta unidad se localiza un nivel de base correspondiente a facies deslizadas del Ciclo Roque Nublo, con una importante matriz arcillosa y con presencia de diques subverticales cuyo comportamiento hidrogeológico puede asimilarse a un medio de muy baja permeabilidad, actuando, pues, como un basamento impermeable a efectos prácticos.

Por encima de esta unidad piroclástica, se encuentran potentes apilamientos de basaltos tabulares del Ciclo Post Roque Nublo, que constituyen parte de la zona de recarga del sistema acuífero que alimenta a los nacientes, principalmente a partir de las discontinuidades tanto por fisuración regional como por disyunción columnar. Estos basaltos presentan buzamiento variable, entre 5 a 15º en promedio, preferentemente hacia el sector meridional -sur y suroeste-. Su potencia va de métrica a decamétrica, llegando el conjunto a superar espesores mayores de 150 m.

Relacionada con esta unidad se encuentran depósitos piroclásticos de transición, localmente compactados y generalmente relacionados con conos de cínder o mantos intercalados. Sus tonalidades van de colores rojizos a grises-marronosos, dependiendo del grado de oxidación. Son muy permeables, en general con débil meteorización (grado II-III). Se sitúan también en la zona de recarga natural del acuífero. Su potencia es variable, de métrica a decimétrica, con importante dispersión lateral.

Con esa distribución litológica, la información hidrogeológica apunta a que el principal acuífero se sitúa entre los piroclastos -en sus tramos más permeables-, y los basaltos Post Roque Nublo, favorecidos por la red de diques que llegan hasta la base de dichas lavas que actúan como vías preferenciales y colectores principales, conjuntamente con el drenaje

subterráneo de los niveles piroclásticos más permeables (Figura 2).

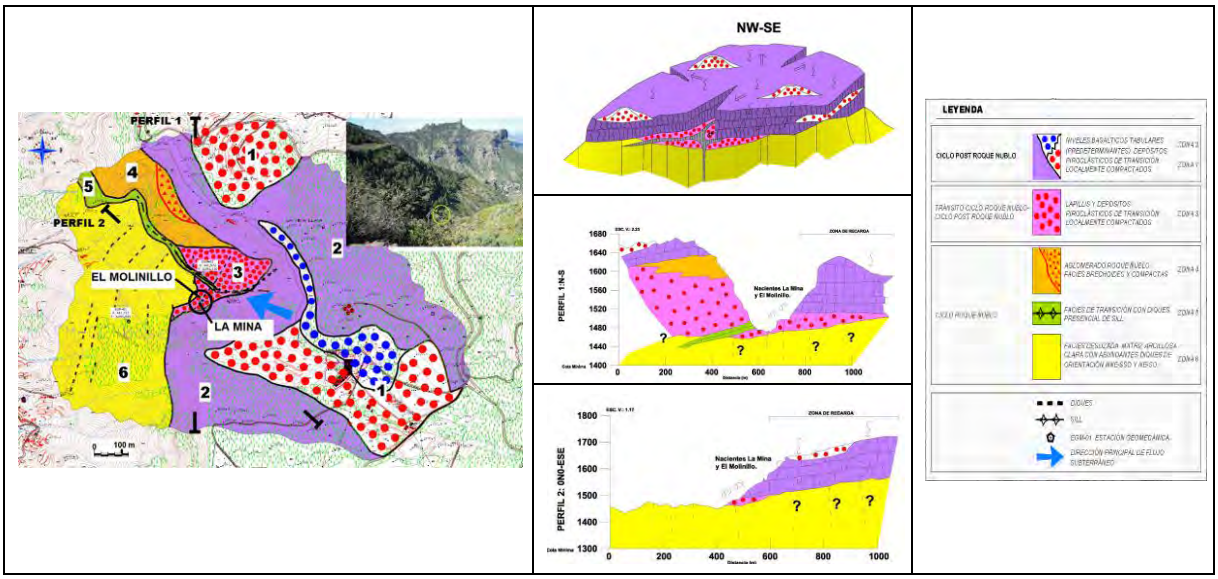


Figura 2.- Zonificación hidrogeológica y modelo conceptual sintético.

No se tiene una medida directa del nivel freático, excepto la correspondiente a la zona de descarga, en el entorno de los 1.471 a 1.478 m, por lo que la masa acuífera asociada se puede considerar independiente del acuífero insular, cuya piezometría quedaría varios cientos de metros por debajo de este sistema. Así pues, el sistema acuífero asociado a los Nacientes "La Mina" y "El Molinillo" puede considerarse como un "acuífero colgado", pero con gran almacenamiento, en la zona de las Cumbres de Tejeda.

Los principales parámetros hidrogeológicos son: T = 10 m^2/día, m = 0,05, i = 0,05 y coeficiente de agotamiento α = 0,0002 $días^{-1}$ (Skupien y Poncela, 2013).

METODOLOGÍA

Durante el periodo 2012-2014 (preceptivo de 12 meses para cada naciente) se han realizado determinaciones “in situ” (temperatura del aire, pH, conductividad eléctrica y temperatura de agua subterránea) y se han recogido muestras para realización de diferentes análisis exigidos por la legislación vigente en materia de declaración de agua como AMN, entre ellos análisis físico-químicos e isotópicos ambientales. Las muestras han sido analizadas en laboratorios acreditados de Las Palmas y Barcelona, con una fiabilidad analítica superior al 95% (datos físico-químicos). En el caso de los resultados isotópicos el error medio ha sido ±0,3 ‰ para $\delta^{18}O$, ±0,8 ‰ para $\delta^{2}H$ y ± 0,5 UT para tritio. El protocolo de toma de las muestras ha sido el siguiente: esterilización del punto de surgencia (tubo de acero galvanizado), toma en régimen laminar o con pocas interferencias, sellado de la muestra para evitar intercambios con la atmósfera, precinto por parte de los Técnicos del Servicio de Minas de Canarias, custodia y transporte en nevera portátil hermética y envío urgente a los laboratorios, quedando garantizada la trazabilidad del proceso.

Con la información obtenida en los preceptivos estudios geológicos e hidrogeológicos realizados se ha caracterizado la composición físicoquímica de las aguas subterráneas muestreadas en los nacientes en relación a la hidrometeorología e hidrodinámica del sistema acuífero local, mediante la utilización, entre otras técnicas, de diagramas hidroquímicos por su fácil interpretación (Custodio, 1978; Custodio y Llamas, 1983).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Hidroquímica

Una de las exigencias requeridas para la declaración de AMN es la homogeneidad hidroquímica de los alumbramientos. Dicha homogeneidad se ha constatado a lo largo de todas las campañas y las pequeñas variaciones quedan justificadas por el propio error analítico de los métodos en laboratorio. Como parámetros más representativos se han seleccionado la conductividad eléctrica, directamente relacionada con el grado de mineralización, y la temperatura, relacionada con el grado de interacción con la atmósfera. En la Figura 3 se muestran los valores de determinaciones "in situ" (temperatura del aire, temperatura de agua alumbrada en ambos nacientes y conductividad eléctrica de agua). En esta figura se observa la estabilidad de los valores de la conductividad eléctrica del agua en el Naciente La Mina (periodo julio 2012-junio 2013), con un valor promedio de 125 µS/cm (intervalo 119-141 µS/cm) para un caudal medio de 11,3 L/s. Los valores de temperatura del agua captada en dicho naciente oscilan en el mismo periodo entre 13,7 y 14,9 ºC (diferencia 1,2º C). También se observa que los valores de conductividad eléctrica del agua captada en el naciente El Molinillo son estables, si bien ligeramente más bajos en comparación con los valores de La Mina (periodo septiembre 2012-agosto 2013), presentando un valor promedio de 112 µS/cm (intervalo 108-116 µS/cm) para un caudal medio de 3,6 L/s. Los valores de temperatura del agua captada en dicho naciente oscilan entre 13,8 y 14,6 ºC (diferencia 0,8º C), muy similares en comparación con los valores medidos en el naciente La Mina.

Se destaca que las aguas subterráneas correspondientes a los Nacientes La Mina y El Molinillo, son de baja mineralización y tienen poca variación en referencia a la conductividad eléctrica de agua. Se trata de aguas frías cuya variación de temperatura a lo largo de año oscila en torno a 1,2º C, en comparación con los 18,7ºC de oscilación térmica de aire, indicando una buena regulación dentro del acuífero.

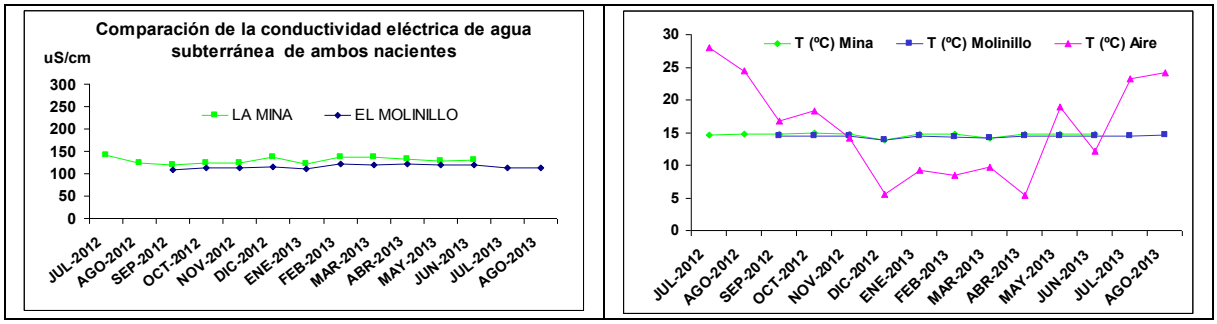


Figura 3.- Diagramas comparativos de la conductividad eléctrica (µS/cm) y temperaturas (ºC) de las aguas muestreadas en los Nacientes La Mina y El Molinillo (Skupien y Poncela, 2013a)

La Figura 4 muestra la representación de los diagramas de Piper y de Stiff de las aguas alumbradas a partir de los análisis físico-químicos realizados en los Nacientes La Mina y El Molinillo durante 12 meses (Skupien y Poncela, 2013b, 2013c, 2013d). Se puede observar que la calidad del agua durante este periodo meses no ha sufrido variaciones significativas, y se ha mantenido muy estable, situándose los principales parámetros físico-químicos dentro del estrecho y asumible intervalo de error de cada análisis (alta fiabilidad). Las aguas captadas en ambos nacientes se clasifican como tipo bicarbonatada cálcico-magnésica.

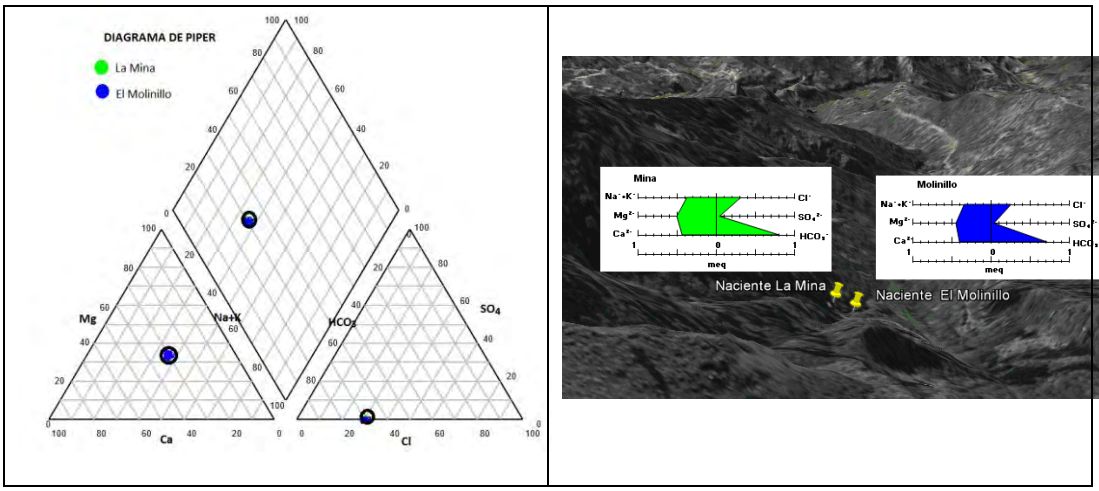


Figura 4.- Diagramas de Piper y de Stiff de las aguas muestreadas en los Nacientes La Mina y El Molinillo (2012-2013).

En la Tabla 1 se presenta la comparación de las medianas de los valores de concentración de las AMN en los Nacientes La Mina y El Molinillo, en relación a las AMN de Canarias y de España (Poncela et al., 2013), donde se destaca que aquellas presentan generalmente valores más bajos en la concentración de iones mayoritarios, así como de conductividad eléctrica. En particular, los bajos valores de ion sodio (<20 mg/L), las hacen especialmente aptas para dietas pobres en este catión. Asimismo, se destaca el alto contenido en sílice (cuatro veces superior al valor nacional), motivado por la presencia de abundantes especies silicatadas en el macizo rocoso que interactúan con las aguas circulantes. El efecto de la aridificación de la recarga en la zona de cumbres parece limitado dado el bajo contenido en ión cloruro.

Tabla 1.- Comparación de los valores de las medianas de concentraciones de los iones mayoritarios y principales parámetros de AMN de La Mina y el Molinillo (24 muestras) con los valores de Canarias y de España (Skupien et al., 2008, 2012).

	HCO_3^- mg/L	$SO_4^=$ mg/L	Cl^- mg/L	NO_3^- mg/L	Na^+ mg/L	K^+ mg/L	Ca^{++} mg/L	Mg^{++} mg/L	SiO_2 mg/L	C.E. µS/cm	pH
La Mina	49,5	2,1	10,7	7,4	7,7	1,6	8,6	6,0	42,4	124,0	7,6
El Molinillo	43,9	2,1	9,2	6,9	6,9	1,6	7,7	5,4	41,1	112,0	7,6
Canarias	100,9	6,9	20,5	15,0	27,1	5,3	12,5	7,0	61,2	261,5	7,8
España	226,0	18,2	14,0	3,4	11,5	1,3	55,7	12,6	9,3	355,0	7,9

Isótopos ambientales

Los resultados de $\delta^{18}O$ en las aguas subterráneas de los Nacientes El Molinillo y La Mina oscilan en un intervalo estrecho entre -4,24 ‰ y -4,77 ‰ (±0,3 ‰), respectivamente, mientras que los valores de $\delta^{2}H$ son muy similares y oscilan entre -24,69 ‰ y -24,73 ‰ (±0,80 ‰), respectivamente. Si bien el número de muestras es muy limitado (6 análisis), los valores de $\delta^{18}O$ están comprendidos entre -4 y -5 ‰, característicos de toda la zona superior de la isla, donde la recarga natural es más importante (SPA-15, 1975). El exceso de deuterio se ajusta razonablemente bien a d= (+11 a +12). La concentración de tritio ha presentado los siguientes resultados: 0,6 ±0,5 UT (La Mina) y 0,2 ±0,4 UT (El Molinillo).

Los puntos muestreados no suelen estar excesivamente alejados de las áreas de recarga natural, lo que sugiere recorridos en los sistemas de flujo no excesivamente largos y, por tanto, compatibles con las analíticas efectuadas que muestran aguas de mineralización débil

y una composición isotópica muy similar en δ^2H y bastante parecida en $\delta^{18}O$, lo que unido a la homogeneidad química observada en ambos nacientes apunta a la existencia de sistemas de flujo no siempre coincidentes y vías preferenciales de recarga, pero dentro de la misma masa acuífera, con un cierto grado de almacenamiento que permite la homogeneización de las aguas subterráneas.

La ligera diferencia en los valores de la concentración de tritio de las aguas alumbradas presenta, además, la incertidumbre asociada el valor del error existente en las determinaciones, llegando incluso a solaparse; no obstante, considerando los criterios hidroquímicos e hidrodinámicos se puede afirmar razonablemente que las aguas muestreadas provienen del mismo sistema acuífero aunque por vías diferentes. Si se acepta que la presencia de valores significativos en la concentración de tritio en el agua subterránea (o por lo menos, contrastables), es un indicio claro de recarga reciente, las precipitaciones actuales están contribuyendo de manera significativa a la recarga en la zona de cumbres de Tejeda y zonas aledañas topográficamente más altas que la zona de descarga del hontanar. Por ello, es esperable que los sistemas de flujo locales, con corto tiempo de tránsito, contengan tritio detectable, en contraposición a sistemas regionales de flujo subterráneo. No obstante, puede existir contribución directa del tritio procedente de las precipitaciones a partir de las vías preferenciales que conectan con niveles más profundos.

CONCLUSIONES

Desde el punto de vista hidroquímico y de características isotópico ambientales se concluye razonablemente que las aguas alumbradas en el entorno de los Nacientes "La Mina" y "El Molinillo" provienen del mismo sistema acuífero, si bien es probable que a través de vías de flujo diferentes, aunque posiblemente interconectadas. La recarga natural al sistema proviene de la infiltración del agua de lluvia, preferentemente en la zona de Cumbres de Tejeda, entre los 1.700 y 1.800 msnm.

Las aguas minerales naturales alumbradas presentan débil mineralización y son del tipo bicarbonatada cálcico-magnésica, pobres en sodio y con elevado contenido en sílice, siendo esta la ventaja competitiva en relación a otras AMN del Archipiélago de Canarias. Asimismo, el comportamiento de las temperaturas del agua en ambos nacientes, en relación a las variaciones de temperatura atmosférica, indican una buena regulación del acuífero asociado. El caudal máximo sostenible de aprovechamiento (agrícola y abasto) para ambos nacientes es de 12 L/s, de los cuales 3 L/s pueden utilizarse para futuro embotellado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen las facilidades prestadas para realización de los trabajos al Ilustre Ayuntamiento de Tejeda, a la Heredad de Las Palmas, Dragonal, Bucio y Briviesca, a la Heredad de El Molinillo y al Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria.

REFERENCIAS

Carracedo, J.C. (2011). *Geología de Canarias I: origen, evolución, edad y volcanismo*. 398 pp. Madrid: Editorial Rueda, S.L.

CIAGC (2013). *Plan Territorial Especial Hidrológico de Gran Canaria (PT-04). Memoria de Información.* Cabildo Insular de Gran Canaria. Las Palmas. 164 pp+Planos+Anexos

Custodio, E. (1978). *Geohidrología de terrenos e islas volcánicas*. Centro de Estudios Hidrográficos e Instituto de Hidrología. Madrid. Publicación 128. 303 pp.

Custodio, E. y Llamas, M.R. (1983). *Hidrología Subterránea*. Omega Ediciones, S.A. Barcelona. 2 vol. 2347 pp.

EGDHGC (2009). *Estudio General de la Demarcación Hidrográfica de Gran Canaria. Plan Hidrológico 2010*. Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria. Las Palmas. 175 pp.

GRAFCAN (2011). *Mapa Geológico de Canarias. Gran Canaria. Memoria. E: 1:105.000.* Cartográfica de Canarias, S.A. 502pp. + 1 CD+7 mapas. Madrid

ITGE (1992). *Mapa Geológico de España. Memoria. E: 1:100.000. Isla de Gran Canaria.* Instituto Tecnológico Geominero de España. Ministerio de Industria y Energía. 323pp. + 1 plano. Madrid.

Poncela, R.; Skupien, E.; Lario, R. y Morales, A. (2013). *Protection perimeters for natural mineral water catchment in volcanic aquifers in the Canary Islands.* International Workshop in Environmental Security Geological Hazards and Management. Tenerife, 10-12 april. Canary Island.

Skupien, E.; Morales, A. y Poncela, R. (2008). *Caracterización hidrogeológica e hidroquímica de las aguas minerales naturales de Canarias.* En López Geta, J.A.; Loredo Pérez, J.; Fernández Ruiz, L. y Pernia Llera, J.Mª. (Eds.): Investigación y gestión de los recursos del subsuelo. Libro homenaje al Profesor Fernando Pendás Fernández. Publicaciones del instituto Geológico y Minero de España. Serie Hidrogeología y Aguas subterráneas (27): 865-880. ISBN: 978-84-7840-773-6.

Skupien, E; Poncela, R.; Morales, A. y Lario, R. (2012). *Aguas minerales naturales en terrenos volcánicos del Archipiélago Canario*. "I Workshop: Estudio, gestión y aprovechamiento del agua en islas y terrenos volcánicos, La Laguna Tenerife 29 y 30 de noviembre de 2012.

Skupien, E. y Poncela, R. (2013a). *Estudio geológico, hidrogeológico e hidroquímico del sistema acuífero asociado a los nacientes "La Mina" y "El Molinillo" para solicitud de autorización de aprovechamiento de agua mineral natural según el Real Decreto 1798/2010 (T.M. de Tejeda).* Ayuntamiento de Tejeda. Informe Técnico. 156 pp + 10 planos.

Skupien, E. y Poncela, R. (2013b). *Informe geológico, hidrogeológico e hidroquímico del sistema acuífero asociado al Naciente "La Mina" (T.M. de Tejeda) para su declaración como agua mineral natural según el Real Decreto 1798/2010.* Ayuntamiento de Tejeda. Informe Técnico. 61 pp + 5 planos + adenda de analíticas.

Skupien, E. y Poncela, R. (2013c). *Informe geológico, hidrogeológico e hidroquímico del sistema acuífero asociado al Naciente "El Molinillo" (T.M. de Tejeda) para su declaración como agua mineral natural según el Real Decreto 1798/2010.* Ayuntamiento de Tejeda. Informe Técnico. 69 pp + 5 planos + adenda de analíticas.

Skupien, E. y Poncela, R. (2013d). *Informe hidroquímico sobre la homogeneidad de las aguas alumbradas en los nacientes La Mina y El Molinillo (T.M. de Tejeda).* Ayuntamiento de Tejeda. Informe Técnico. 36 pp + 2 planos + anexos.

SPA-15 (1975). *Estudio científico de los recursos de agua en las Islas Canarias.* SPA/69/515. Minist. Obr. Públ. Dir. Gral. Obr. Hidrául. UNESCO. Madrid-Las Palmas.

ISBN: 978-84-938046-4-0

CUANTIFICACIÓN DE LA CAPTACIÓN DE AGUA DE NIEBLA EN TRES LOCALIZACIONES DE TENERIFE

Axel RITTER[1], Carlos M. REGALADO[2] y Juan Carlos GUERRA[3]

[1] Universidad de La Laguna, Área de Ingeniería Agroforestal, Ctra. Geneto, 2, La Laguna, 38200 Tenerife, aritter@ull.es
[2] Instituto Canario de Investigaciones Agrarias (ICIA), Dep. Suelos y Riegos, Apdo. 60 La Laguna, 38200 Tenerife, cregalad@icia.es
[3] Universidad de La Laguna, Grupo de Investigación en Hidrometeorología, Facultad de Ciencias, Avda. Astrofísico Francisco Sánchez s/n, La Laguna 38271 Tenerife, jcguerra@ull.es

RESUMEN

La presencia en Canarias de un manto de estratocúmulos estable entre los 600 y 1400 metros sobre el nivel mar, asociado a la inversión de temperatura típica de la región subtropical, es el responsable último del denominado fenómeno de precipitación de niebla. Bien sea por medios naturales, tales como las hojas de árboles, como artificiales, mediante captadores de malla, el agua aportada por la precipitación de niebla podría suponer un recurso hídrico de interés para Canarias. Se presentan los resultados de medidas de captación de niebla obtenidas con captadores cilíndricos en tres localizaciones de la isla de Tenerife: La Esperanza (1093 m s.n.m. N-NE), Taborno (1015 m s.n.m. N-NE), El Gaitero (1747 m s.n.m. N-NW). Se midieron además las variables meteorológicas concomitantes durante eventos de niebla y lluvia. Se demuestra que, en términos de número de eventos, la precipitación de niebla es un fenómeno más frecuente que la lluvia. Sin embargo, los volúmenes y frecuencias de recogida de agua de niebla entre los tres sitios estudiados varían, no superando generalmente los 10-20 litros por m^2 de malla al día y alcanzando máximos absolutos excepcionales de 112 litros/m^2 malla.

Palabras clave: *Captación de niebla; inversión térmica; mar de nubes; niebla; precipitación.*

ABSTRACT

The presence of a stable stratocumulus belt between 600 and 1400 meters above sea level in the Canary Islands, associated with the typical temperature inversion of the subtropical region, is ultimately responsible for the phenomenon referred as fog precipitation. Whether by natural means, such as the leaves of trees, or by artificial mesh collectors, the water provided by fog precipitation may represent a hydrological resource of interest to the Canaries. We present the results of measurements of fog water collection obtained with cylindrical fog catchers at three locations on the island of Tenerife: La Esperanza (1093 m a.s.l. N-NE), Taborno (1015 m a.s.l. N-NE), El Gaitero (1747 m a.s.l. N-NW). Concomitant meteorological variables were also measured during fog and rain events. We show that, in terms of number of events, fog precipitation is more frequent than rain. However, the volume and frequency of daily fog water collection between the three studied sites varied, usually not exceeding 10-20 liters per m^2 of mesh and exceptionally reaching an absolute maximum of 112 liters/m^2 mesh.

Key words: *Cloud belt; fog; fog collection; precipitation; temperature inversion.*

INTRODUCCIÓN

La estructura térmica vertical de la atmósfera en la región de la Macaronesia, caracterizada por la existencia de una inversión de temperatura en altura, resultado de la subsidencia asociada a la rama descendente de la célula norte de circulación general de Hadley (Guerra et al., 2007), unido al ascenso orográfico de masas de aire húmedo empujadas por los alisios contra las islas de mayor relieve, da lugar al establecimiento de un manto de estratocúmulos más o menos estable entre 900-1500 m.s.n.m. Esto conlleva la presencia de nubes bajas o niebla principalmente en la vertiente norte de las Islas Canarias occidentales, lo que permite que ésta pueda ser aprovechada de forma artificial mediante, por ejemplo, captadores de malla dispuestos en zonas expuestas al viento con frecuente presencia de nubes. A diferencia del fenómeno del rocío, en el que se obtiene agua líquida como consecuencia de la condensación del vapor de agua sobre una superficie que se encuentra a una menor temperatura que la del aire, la captación de agua de niebla consiste en recolectar las gotitas de agua líquida (0.1-200 µm de diámetro; Glickman, 2000) suspendidas en una masa de aire saturada de vapor de agua. Por tanto no se produce cambio de fase de estado del agua recolectada. Esta agua líquida sólo representa una cantidad del orden de 0.1-1.25 g m^{-3} de aire (Ide, 1999), y está determinada por la densidad y distribución de diámetros de las gotas presentes en la niebla (Klemm et al., 2005; Eugster et al., 2006). El contenido en agua líquida condiciona por tanto la cantidad potencial (máxima) de agua que puede obtenerse a partir de la niebla a una determinada temperatura. Por otro lado, para capturar las gotitas de agua contenidas en la niebla, éstas deben impactar sobre alguna superficie que actúe como un obstáculo que se interpone en su trayectoria de desplazamiento. La eficiencia de captación depende en gran medida de la velocidad de desplazamiento y del tamaño de las gotitas (concretamente de los números de Stokes y Reynolds), así como de la geometría del obstáculo, y por tanto del tipo de captador (Shuttleworth, 1977; Ritter et al., 2008). Teniendo en cuenta estos tres requisitos (tamaño del elemento recolector, distribución de frecuencias del diámetro de gotas y contenido en agua líquida), se pueden diseñar distintos dispositivos para recoger agua de niebla de forma artificial (Skarżyńska et al., 2006). Por lo general se trata de elementos de recolección ~~p~~asivos", con superficies de recogida del orden de pocos metros cuadrados (0.5-10 m^2), y donde la energía cinética necesaria para que las gotas impacten depende de las características del viento (velocidad y dirección) existentes en el lugar donde se ubiquen. Estudios diversos alrededor del Mundo proporcionan distintos rendimientos de captadores ~~p~~asivos" que varían desde 0.2–4 l $m^{-2}d^{-1}$ (Tabla 1 en Bruijnzeel y Proctor, 1998). Sin embargo, estos valores deben tomarse con cautela dado que las distintas condiciones y tiempos de recolección de niebla, así como los diferentes tipos de captadores utilizados en esos trabajos hacen difícil su comparación o extrapolación a otros escenarios. La capacidad de recolección de un captador pasivo concreto, además de por su diseño particular, está fuertemente condicionada por la velocidad efectiva del viento. Esto explica que en algunas zonas donde la existencia de niebla es frecuente se recojan sin embargo cantidades despreciables de agua mediante captadores pasivos, debido a que por ejemplo las condiciones particulares de exposición del captador y las escasas rachas de viento existentes en la zona no permiten rendimientos significativos (Ritter et al., 2007). Entre las ventajas de los métodos pasivos se encuentra su bajo coste y la posibilidad de fabricación de forma artesanal dada su sencillez. Si bien es cierto que el mantenimiento diario de un captador es mínimo, sin embargo al encontrarse expuestos al viento no son infrecuentes las roturas de la malla o de la propia estructura cuando se producen fuertes rachas de viento. Como desventajas cabe citar la ya comentada dependencia de las condiciones meteorológicas reinantes, así como de la orografía de la zona, y por tanto la reducida fiabilidad de los métodos pasivos cuando se precisan caudales de agua más o menos constantes. Los estudios sobre captación artificial de niebla realizados en Canarias hasta la fecha han utilizado bien captadores cilíndricos tipo Hohenpeissenberg de Grunow (Kämmer, 1974) o planos (Santana, 1986; Marzol, 2002).

El objetivo de este trabajo es abundar en el conocimiento de la captación del agua de niebla en Canarias para determinar en qué situaciones y bajo qué condicionantes puede ser considerada una fuente de agua aprovechable. En concreto se pretende investigar hasta qué punto las condiciones meteorológicas existentes en el norte de la isla de Tenerife y el número de eventos y volúmenes de agua de niebla recogidos de forma artificial podrían permitir utilizar este recurso hídrico con fines agroforestales.

METODOLOGÍA

Se seleccionaron tres lugares para el seguimiento de variables micrometeorológicas y recogida de niebla en la vertiente norte de la isla de Tenerife en las zonas conocidas como La Esperanza, Taborno y El Gaitero. El sitio denominado como La Esperanza se encuentra localizado sobre un depósito regulador de agua potable en el municipio del Rosario a una altura de 1093 m s.n.m. (X: 365 078 m Y: 3 147 143 m; 28N R zona; WGS84), orientado al N-NW y afectado frecuentemente por eventos de niebla. La vegetación natural de la zona es pinar y fayal-brezal. En las inmediaciones existen numerosas plantaciones de papa. El sitio denominado Taborno se localiza en el macizo de Anaga, en el extremo noreste de la isla de Tenerife y junto a la montaña de la Cruz de Taborno, que representa el emplazamiento más elevado dentro del parque rural de Anaga, con una altura de 1015 m s.n.m (X: 375 832 m Y: 3 157 237 m; 28N R zona; WGS84). La zona experimental se encuentra ubicada en las instalaciones que la Agencia Española de Navegación Aérea (AENA) gestiona en dicho lugar y donde se localiza uno de los radares de apoyo a la navegación aérea existentes en las islas Canarias. La localización geográfica de este sitio, así como el hecho de estar situada en la zona más alta del macizo de Anaga, y por tanto expuesta hacia la dirección predominante del flujo en superficie, el Alisio que sopla del NE, garantiza que la mayor parte del año ésta se encuentre dentro del estratocúmulo que genera la inversión de subsidencia. La vegetación de la zona es de tipo fayal-brezal con abundantes líquenes epifitos como marca de dicha exposición a la niebla. El Gaitero es una zona de pinar situada a 1747 m s.n.m. con orientación N-NW (X: 359 583 m Y: 3 141 762 m; 28N R zona; WGS84).

En cada localización se tomaron medidas de variables micrometeorológicas y se midieron volúmenes de agua de niebla captada. Los datos micrometeorológicos se obtuvieron con sensores colocados sobre una torre de 7 m de altura, tomando medidas cada minuto y almacenando en un registrador Combilog (Up GmbH, Cottbus, Alemania) las medias o totales cada 15 minutos. Las variables registradas fueron: temperatura y humedad relativa (termohigrómetro HMP45C, Campbell Scientific Ltd., Lougborough, Reino Unido); radiación global (piranómetro SKS 1110, Skye Instruments Ltd., Powys, Reino Unido); dirección (veleta W200P, Campbell Scientific Ltd., EE. UU.) y velocidad (anemómetro A100R, Campbell Scientific Ltd.) de viento; lluvia incidente (pluviómetro Rain-O-Matic Professional, 0.2 mm resolución; Pronamic Bekhøi International Trading Engineering Co. Ltd., Dinamarca). El agua de niebla se recolectó con un captador pasivo cilíndrico tipo Juvik, construido con dos capas concéntricas de malla de monofilamentos verticales de hilos de nailon ($\varnothing$=0.5 mm; espaciado entre filamentos 2 mm), de 46 cm de alto y 20 cm de diámetro exterior, lo que implica una superficie de malla normal a la dirección del viento y expuesta al impacto de las gotas de 920 cm^2 (= 46 $\times$ 20). La salida inferior del captador se conectó mediante una manguera a un pluviómetro Rain-O-Matic para registrar el volumen de agua de niebla recogida. Los volúmenes medidos se refirieron al área efectiva de impacto (920 cm^2), esto es en unidades L m^{-2} superficie vertical. Aunque el captador cuenta con una cubierta que minimiza la recogida de lluvia durante fenómenos de precipitación mixta (lluvia + niebla), se descartaron del cómputo total del agua de niebla recogida, aquellos eventos en los que también se observó lluvia, para evitar así conteos espurios como consecuencia del registro de gotas de agua de lluvia que pudieran caer oblicuamente transportadas por el viento en el captador.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evolución de las variables registradas en la localización de La Esperanza

La Figura 1a-f muestra los registros de las diversas variables medidas en intervalos de 15 minutos en el sitio de La Esperanza durante el periodo comprendido entre julio de 2012 y el 25 de noviembre de 2013. La precipitación total registrada fue de 1063.4 mm habiéndose producido principalmente en los meses de octubre y noviembre de 2012. En el resto del periodo, los eventos de lluvia (a intervalos de 15 minutos) no superaron los 5 mm, salvo en tres ocasiones (Figura 1a). Los valores diarios de lluvia se ilustran en la Figura 2a donde se observan eventos de lluvia considerables que superan los 30 mm/día. Los datos registrados de captación de agua de niebla no muestran grandes cantidades (generalmente inferiores a los 0.4 l/m^2 en 15 minutos). Un fallo en el pluviómetro registrador del captador no permitió contar con más datos a partir de mayo de 2013 (Figura 1b). Los totales diarios correspondientes se muestran en la Figura 2b, y no superan los 16 l m^{-2} día^{-1} salvo en dos ocasiones (26.8 y 33.8 l m^{-2} día^{-1}).

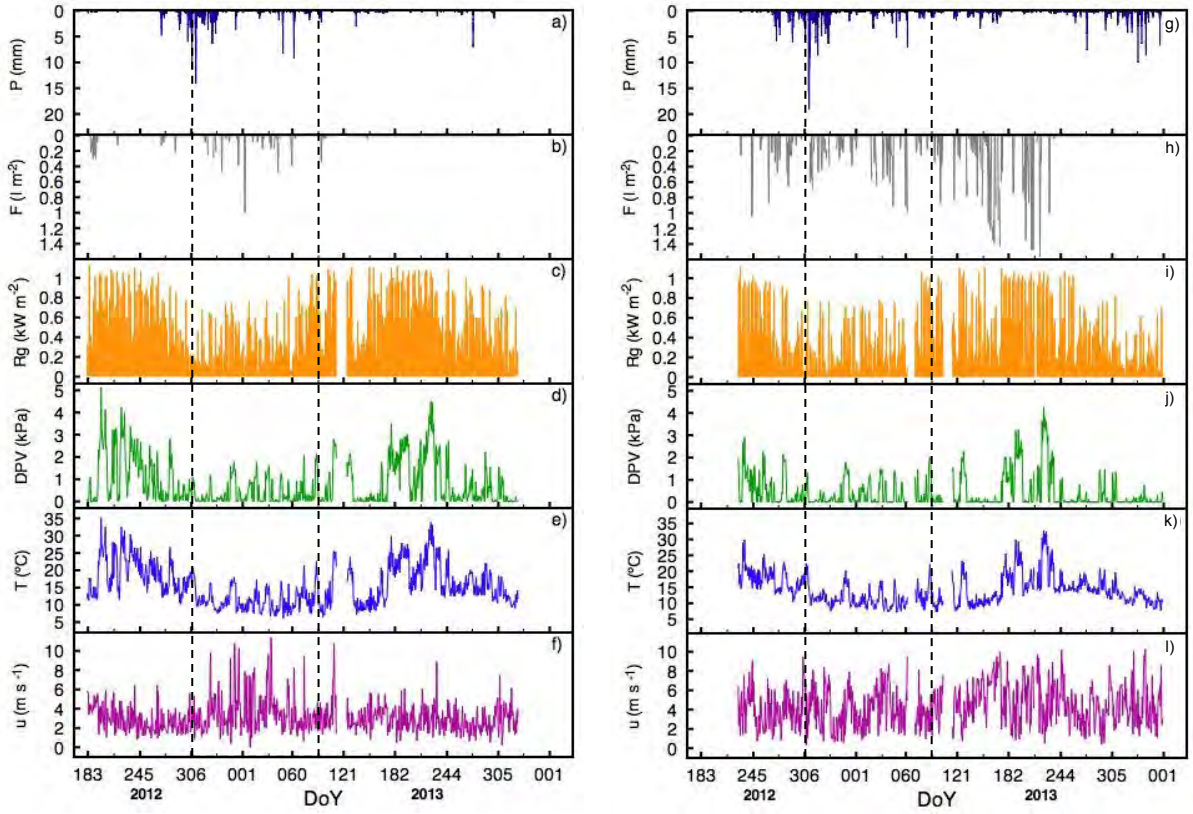


Figura 1. Evolución de las variables registradas durante el periodo estudiado (La Esperanza: 1/07/2012 – 25/11/2013; Taborno: 1/07/2012 – 25/11/2013). Éstas incluyen lluvia (P); agua de niebla recogida en el captador (F); radiación global (Rg); déficit de presión de vapor (DPV); temperatura del aire (T); y velocidad del viento (u).

Durante los meses febrero 2013 y julio 2012 se contabilizó el mayor número de eventos de niebla >500 eventos/mes. Por el contrario, julio del 2013 fue un mes de escasa incidencia de niebla (63 eventos registrados), lo que pone en evidencia el carácter impredecible del fenómeno de precipitación de niebla. De hecho el verano de 2013 resultó ser un periodo seco con escasa incidencia tanto de niebla como de lluvia. El trimestre que ocupa noviembre 2012 a enero 2013 fue un periodo húmedo con respecto a la recogida de niebla, aunque

durante noviembre 2012 la niebla es inferior a la lluvia registrada, por lo que en términos relativos ésta ve mermada su importancia Figura 2g.

Evolución de las variables registradas en la localización de Taborno

La Figura 1g-l muestra los registros de las diversas variables medidas en intervalos de 15 minutos. La precipitación total durante el periodo desde mediados de agosto 2012 hasta final de diciembre 2013 fue de 1835 mm. La mayoría de eventos de lluvia tuvieron lugar entre octubre-noviembre de 2012 y durante los meses de mayo-junio y noviembre-diciembre 2013 (Figura 1g). La correspondiente serie de lluvia diaria se recoge en la Figura 2c, donde destacan tres días, en el periodo estudiado, por las altas precipitaciones registradas que alcanzan valores de 75.2 mm (18/10/2012), 243.2 mm (7/11/2012) y 75 mm (11/12/2013). La recogida de agua de niebla por el captador cilíndrico se produjo a lo largo de todo el periodo (Figura 1h y Figura 2d), sumando un total de 157 litros (o 3611.83 l/m^2 de superficie vertical). A partir del mes de septiembre y hasta diciembre de 2013, un fallo del pluviómetro registrador del agua de niebla recogida no ha permitido contar con los correspondientes datos durante este intervalo de tiempo. Las cantidades de niebla observadas (a intervalos de 15 minutos) fueron en general inferiores a 1.0 l/m^2, salvo en los meses de verano de 2013 donde en ocasiones se superaron estas magnitudes, llegando a alcanzar valores de 1.65 l/m^2. De acuerdo con los totales diarios, en la mayoría de los días en los que hubo eventos de niebla, los valores registrados fueron inferiores a 40 l m^{-2} día^{-1} (Figura 2d). En un 33% del total de días registrados de captación de agua de niebla (168 sobre 504) se obtuvieron valores superiores a 8 l m^{-2} día^{-1}). Los días de mayor intensidad de agua de niebla recogida se produjeron durante los meses de junio y julio de 2013 registrándose un máximo de 87.5 m^{-2} día^{-1} el 14 de junio 2013 (Figura 2d).

Durante el periodo de estudio se contabilizó 8877 eventos de captación de agua de niebla frente a 2899 de lluvia que se distribuyen mensualmente según muestra la Figura 2h. Durante los meses de septiembre 2012 hasta julio 2013, se alcanzan más de 500 eventos/mes de agua de niebla, llegando a superar los 800 eventos/mes en noviembre, febrero 2012 y mayo 2013, siendo junio 2013, con 1236 eventos, el periodo en el que se observó más recogida de agua de niebla. Sin embargo, en el mismo periodo, los eventos de lluvia rara vez superan los 300 eventos/mes, con la excepción de noviembre 2012 con 499 eventos de lluvia registrados. En general, los eventos de lluvia por mes son inferiores al 30% de lo que suponen los eventos de recolección de agua de niebla. Únicamente en el lluvioso mes de noviembre de 2012 este porcentaje alcanza el 61%.

Comparación de eventos de lluvia y niebla en la localización de El Gaitero

En la Figura 2e-f se muestran los totales diarios de lluvia y de agua recolectada mediante el captador cilíndrico durante el periodo comprendido entre 10/10/2012 y 31/12/2013. Se observan algunos sucesos de lluvia durante final de enero y mediados de mayo de 2013, pero el agua de lluvia registrada durante ese periodo corresponde principalmente a los eventos que tuvieron lugar a partir de octubre de 2013. La lluvia total registrada asciende a 395.4 mm, a los cuales contribuyeron dos eventos concretos durante días consecutivos en diciembre de 2013 con 83.8 mm y 60.4 mm. Estos representan un 36.5% de la lluvia total caída en los 12 meses de registro (Figura 2e). En esta localización se registran cantidades de agua de niebla captada durante varias épocas dentro del periodo estudiado (Figura 2f). En comparación con los anteriores lugares de medida, los eventos de captación de agua de niebla en esta localización parecen menos frecuentes, pero de mayor intensidad, superando en numerosas ocasiones los 10 l m^{-2} día^{-1}. Destaca el periodo comprendido entre 28/11/2012 – 6/12/2012 en el que se alcanzan máximos diarios 81.4, 88.3 y 112.1 l m^{-2} día^{-1}. En comparación con las otras dos localizaciones, estas cantidades son sólo equiparables a un máximo de 87.5 l m^{-2} día^{-1} registrado en Taborno (Figura 2d).

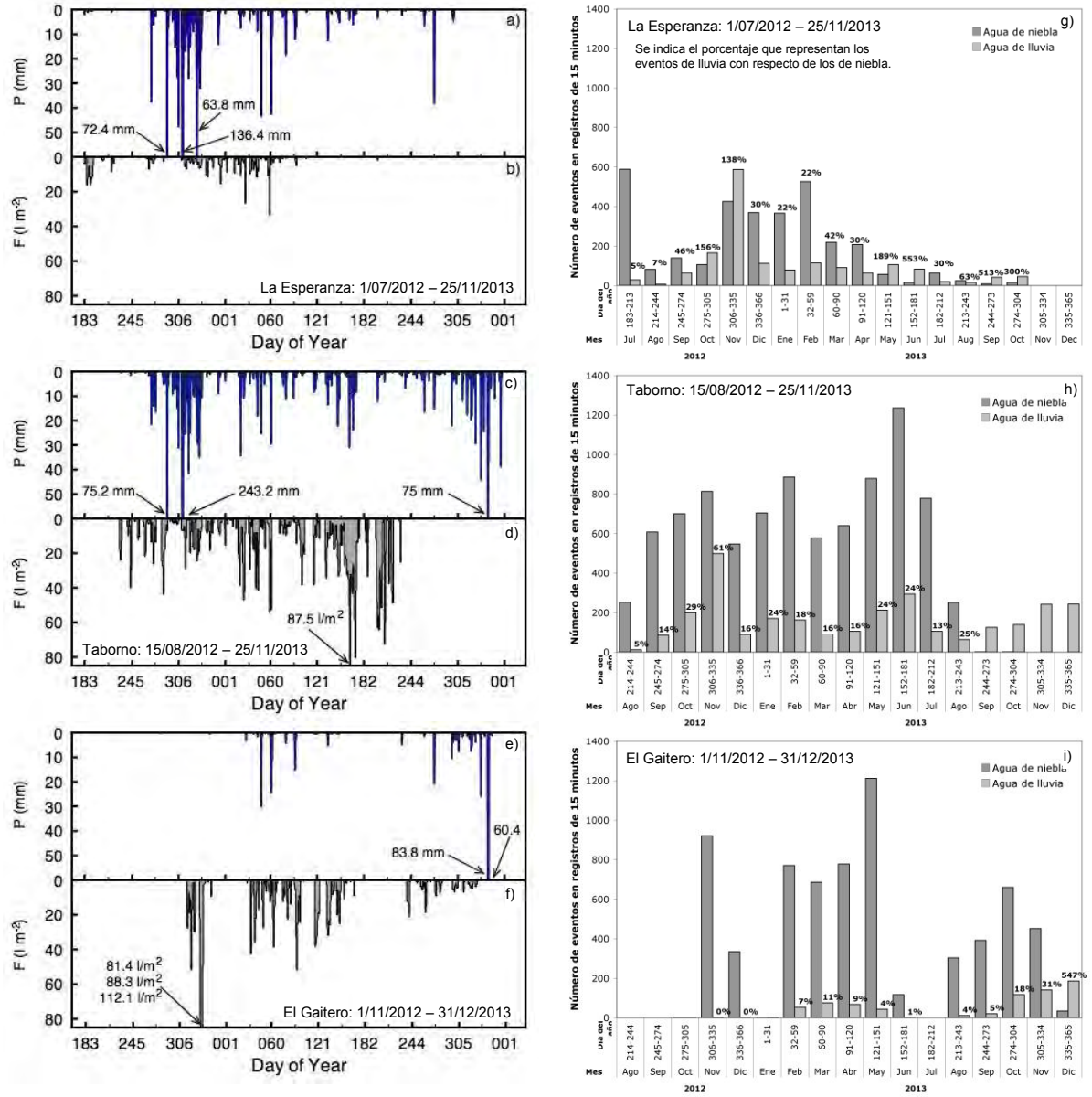


Figura 2. Evolución durante el periodo estudiado de los totales diarios de lluvia (P) y agua de niebla recogida en el captador (F) en La Esperanza (a, b); Taborno (c, d) y El Gaitero (e, f). Comparación del número de eventos registrados con el pluviómetro y con el captador de agua de niebla cilíndrico durante el periodo estudiado: g) La Esperanza; h) Taborno; e i) El Gaitero.

En la localización del Gaitero es donde los eventos en los que se recogió niebla fueron más importantes en términos relativos con respecto a aquellos en los que se observó lluvia (Figura 2i): 6663 vs. 722 registros de 15 minutos. Con excepción del último mes del periodo monitorizado, la lluvia no supuso más del 31% de eventos de niebla medidos. Se registraron seis meses con más de 500 eventos de recogida de agua de niebla, destacando el mes de mayo de 2013 con 1212 pulsos de niebla medidos frente a tan solo 43 de lluvia. El cuatrimestre comprendido entre febrero y mayo de 2013 resultó ser especialmente importante en eventos de captación de agua de niebla observados, con 3447 sucesos registrados frente a tan solo 240 de lluvia en el mismo intervalo de tiempo.

Comparación de los tres sitios de medida en términos del agua de niebla captada

Con el objetivo de comparar los lugares donde se ha medido con respecto de su potencial para captar agua de niebla artificialmente, se ha elegido el periodo comprendido entre 1/11/2012 al 31/03/2013, ya que durante este intervalo de tiempo las tres localizaciones cuentan con datos obtenidos del captador cilíndrico. La evolución de los totales diarios se muestra en la Figura 3. En la zona de La Esperanza (a una cota de 1093 m s.n.m.) la captación de agua de niebla se produce de forma frecuente durante el periodo, pero es considerablemente inferior que en las otras dos localidades, con intensidades generalmente inferiores a los 10 l m^{-2} $día^{-1}$. Sólo en tres días se alcanzan 15.4, 26.8 y 33.8 l m^{-2} $día^{-1}$, respectivamente (Figura 3). Expresado en volumen, el total de agua recogida asciende a 32.9 litros, mientras que en Taborno (1015 m s.n.m.) y en El Gaitero (1747 m s.n.m.) las cantidades recogidas fueron mucho mayor 98 y 88.8 litros, respectivamente. No obstante, mientras que en Taborno se observan episodios de recolección de agua de niebla distribuidos a lo largo del periodo, en el Gaitero, éstos se concentran principalmente en dos periodos (noviembre y diciembre 2012; febrero y marzo 2013). Llama la atención en El Gaitero, que desde 28/11/2012 al 2/12/2012 se recogen grandes cantidades de agua de niebla, destacando un máximo de 112.1 l m^{-2} $día^{-1}$. Las variaciones observadas en los diferentes emplazamientos con respecto de la captación de agua de niebla están relacionadas con las condiciones meteorológicas de cada lugar, que vienen determinadas por su localización. El estudio de las relaciones entre la captación de nieblas y los promedios diarios de las variables meteorológicas sugiere que los mayores volúmenes de agua recogidos están asociados con episodios de velocidades de viento más altas, así como condiciones de déficit de presión de vapor bajo (resultados no mostrados).

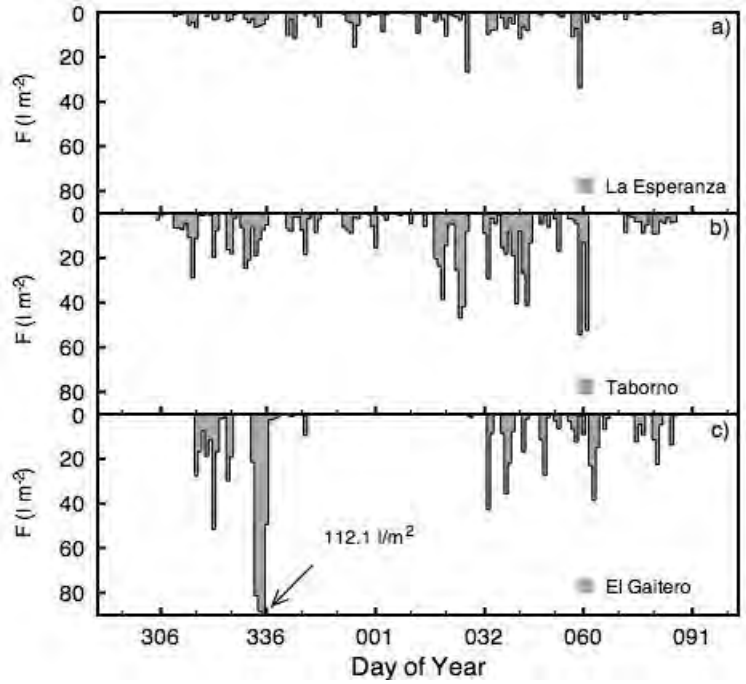


Figura 3. Comparación el periodo estudiado (1/11/2012 – 31/03/2013) de los totales diarios agua de niebla recogida en el captador (F) cilíndrico en a) La Esperanza, b) Taborno y c) El Gaitero.

CONCLUSIONES

En general y según el número de eventos, la recolección de niebla resultó ser un fenómeno más frecuente que la lluvia en todos los lugares estudiados. Los volúmenes de agua de niebla captada variaron entre los distintos sitios analizados: mientras que en

algunas localizaciones las intensidades diarias fueron generalmente inferiores a los 10 l m^{-2} de superficie vertical (con un máximo absoluto de 33.8 l m^{-2} $día^{-1}$) en otro lugar se llegó a registrar un máximo diario de 112.1 l m^{-2} de superficie vertical. Durante un periodo comparativo de nueve meses se obtuvo las siguientes cantidades totalizadas de agua de niebla en los tres sitios de estudio: 468.3, 506.5 y 350.6 l m^{-2} de superficie vertical. Un hecho característico del fenómeno de captación de niebla es que su aprovechamiento depende de las condiciones locales. Se recomienda por tanto un estudio previo de captación a pequeña escala, como el realizado en este trabajo, para determinar hasta qué punto ésta supone un recurso fiable (esto es, disponible a lo largo del periodo que se requiere su uso), suficiente (es decir con una infraestructura mínima se garantizan rendimientos significativos de agua de niebla) y viable (es económicamente rentable y su implementación resulta práctica).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado con fondos de los siguientes proyectos: INIA-RTA2009-161, INIA-RTA2013-00088 y CajaCanarias Fundación-ECANSA. Los autores agradecen a AENA el permitirles acceso a sus instalaciones en Taborno y a Sieltec Canarias S.L. por su apoyo técnico, así como a Agrocabildo por aportar datos meteorológicos en la localización de El Gaitero.

REFERENCIAS

Bruijnzeel, L.A. y Proctor, J. (1998). *Hydrology and biochemistry of tropical montane cloud forests: What do we really know?.* En: Hamilton, L.S.; Juvik, J.O. y Scatena, F.N. (eds.). Tropical montane cloud forests.. Ecological Studies no. 110. Springer-Verlag, New York, pp. 38-78.

Glickman, T.S. (ed.) (2000). *Glossary of Meteorology*. 2ª edición. Boston, MA.

Guerra J.C.; Carrillo, J.; Rodríguez, J.; Arencibia, M.T. y Cuevas, E. (2007). Thermodynamic structure of the lower subtropical troposphere over the Canary Islands. En: 7th Annual Meeting of the European Meteorological Society, Vol. 4, EMS2007-A-00554.

Eugster, W.; Burkard, R.; Holwerda, F.; Scatena, F.N. y Bruijnzeel, L.A. (2006). *Characteristics of fog and fogwater fluxes in a Puerto Rican elfin cloud forest*. Agric. For. Meteorol. 139: 288-306.

Ide, R.F. (1999). *Comparison of liquid water content measurement techniques in an icing wind tunnel*. NASA Technical Memorandum. NASA/TM—1999-209643.

Kämmer F. (1974). *Klima und Vegetation auf Tenerife, besonders in Hinblick auf den Nebelniederschlag*. Scripta Geobotanica 7: 1–78.

Klemm, O.; Wrzesinsky, T. y Scheer, C. (2005). *Fog water flux at a canopy top: Direct measurement versus one-dimensional model*. Atmos. Environ. 39: 5375–5386.

Marzol Jaen, M.V. (2002). *Fog water collection in a rural park in the Canary Islands (Spain)*. Atmospheric Research 64: 239–250.

Ritter, A.; Regalado, C.M. y Aschan, G. (2007). *An impaction model for estimating fog water collection in a subtropical laurel cloud forest of the Garajonay National Park*. En: Biggs, A. y Cereceda, P. (eds.) Proceedings of the Fourth International Conference on Fog, Fog Collection and Dew, La Serena, Chile, pp. 355-358.

Ritter, A.; Regalado C.M. y Aschan, G. (2008). *Fog water collection in a subtropical elfin laurel forest of the Garajonay National Park (Canary Islands): a combined approach using artificial fog catchers and a physically-based impaction model*. J. Hydrometeorology 9: 920–935.

Santana, L. (1986). *Estudio de la precipitación de niebla en Tenerife*. ICONA. 97 pp.

Shuttleworth, W.J. (1977). *The exchange of wind-driven fog and mist between vegetation and the atmosphere*. Boundary-Layer Meteorology 12: 463-489.

Skarżyńska, K.; Polkowska, Ż. y Namieśnik, J. (2006). *Sampling of atmospheric precipitation and deposits for analysis of atmospheric pollution*. Journal of Automated Methods and Management in Chemistry ID 26908: 1–19.

ISBN: 978-84-938046-4-0

EL FLÚOR EN LAS AGUAS DE ABASTECIMIENTO DE LA REGIÓN DE LA MACARONESIA: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y VÍAS DE INVESTIGACIÓN ABIERTAS

Juan C. SANTAMARTA[1], Francisco C. RODRIGUES[2] y Silvia QUADROS[3]

[1]Universidad de La Laguna. Área de Ingeniería Agroforestal, Tenerife, España. jcsanta@ull.es
[2]Universidade dos Açores. Departamento de Ciências Agrárias, 9700 Angra do Heroísmo,Portugal. cota@uac.pt
[3]Climate, Meteorology and Global Change Group (C_CMMG, CITA-A), Agricultural Sciences Department, Azores University. Rua Capitão João D' Avila, Angra do Heroísmo, Portugal. squadros@uac.pt

RESUMEN

El agua en la región de la Macaronesia es obtenida, dependiendo del archipiélago considerado, mediante el aprovechamiento de recursos subterráneos principalmente, seguido de los recursos no convencionales, como la desalación y depuración de aguas y, finalmente, en mucha menor cuantía, los recursos superficiales. Las dos últimas fuentes no presentan problemas de calidad importantes, dado que en la desalación es posible modular la calidad requerida para su uso en la agricultura o bien, en el abastecimiento urbano. En el caso de los recursos superficiales, la calidad se puede ver influenciada por procesos de eutrofización, si bien, estos recursos en ningún caso se utilizan para abastecimiento urbano. Con respecto a las aguas subterráneas, existe un riesgo patente y en relativo crecimiento que es la presencia de flúor, en cantidades que superan ampliamente el máximo permitido de 1,5 mg/L. Este problema, que afecta a las aguas de abasto, se hace sensible en aguas de las islas Macaronésicas de Tenerife (Canarias, España), San Miguel y Terceira (Azores, Portugal). El presente documento, analiza estas amenazas para el consumo de aguas por parte de la población, sus fuentes principales y finalmente abre vías de investigación para su identificación y posible remediación.

Palabras clave: *Flúor, Macaronesia, Aguas de abasto, Hidrogeología, Remediación.*

ABSTRACT

Water in the region of Macaronesia is obtained, depending on the archipelago considered by exploiting groundwater resources mainly, followed by non-natural resources, such as desalination and water treatment, and finally, to a much lesser extent, surface water resources.The last two sources have no major quality problems, as in desalination is possible to modulate the quality required for use in agriculture or in urban water supply. In the case of surface resources, the quality can be influenced by eutrophication, although in no

case these resources are used for urban supply. With respect to groundwater, there is a clear and growing threat, the existence of amounts of fluoride in the water that exceed the maximum allowed, 1.5 mg/L. This problem affects water supply in areas studied in macaronesian islands like Tenerife (Canary Islands, Spain), San Miguel and Terceira (Azores, Portugal). This paper analyzes these threats to water consumption, their main sources and finally opens new research topics for identification and possible remediation of the problem.

Key words: *Fluoride, Macaronesia, water supply, hydrogeology, remediation.*

INTRODUCCIÓN

Existen numerosos acuíferos a lo largo del mundo con problemas por sus altos niveles de flúor. Las aguas subterráneas son más vulnerables al enriquecimiento en flúor, que las aguas subterráneas, dado que en aquellas existen mayores interacciones agua-roca.

Las rocas volcánicas e ígneas, tienen una concentración de flúor entre 100 partes por millón (ppm) hasta 1000 ppm (Frencken, 1992). La exposición al fluoruro en las personas depende: i) de la concentración en el agua potable, ii) la duración del consumo y, iii) el clima de la zona de estudio.

La toxicidad de este elemento reside en que los iones fluoruros actúan como venenos enzimáticos, inhibiendo la actividad enzimática y, en última instancia, interrumpiendo procesos metabólicos tales como la glucólisis y la síntesis de proteínas (Camargo, 2003). La ingestión excesiva de flúor puede dar lugar a anomalías como la fluorosis dental y la esquelética. Aunque, a priori, este elemento refuerza ambas estructuras, unas dosis demasiado elevadas revierten el proceso haciéndolas más débiles y quebradizas.

La vía principal de exposición del hombre al flúor es por consumo de agua y alimentos con altos contenidos en flúor debido, en muchos casos, a contaminaciones naturales (India, Canarias, Azores, México, Pakistán, etc.).

A nivel de gestión del suministro de agua, el agua se extrae mediante las galerías o pozos, las primeras suelen estar en cotas altas de las islas, los pozos en zonas más cercanas a la costa, como norma general, el agua se transporta mediante canales o tuberías y, posteriormente, se almacena en depósitos, de ahí, se distribuye hasta las zonas de consumo. Las sales de flúor, no se depositan en el fondo o en las paredes de tuberías o depósitos, sino que se mezclan volumétricamente con el agua.

El contenido en flúor en las aguas de abasto no debe exceder de 1,5 mg/L, con el fin de prevenir la fluorosis dental y las enfermedades relacionadas con los huesos. La región de la Macaronesia comprende, geográficamente, una serie de archipiélagos en el océano Atlántico, que incluye — de norte a sur— , Azores, Madeira, Canarias y Cabo Verde.

En el caso de Azores y Canarias, la fluorosis dental, se está convirtiendo una enfermedad endémica, debido a los altos contenidos de flúor, analizados en explotaciones de aguas subterráneas. En el II estudio epidemiológico en Canarias durante el periodo de 1998, el cual se realizó en escolares de 7, 12, y 14 años de cada una de las islas se encontró una prevalencia de fluorosis dental para la población de 12 años con 38,71 %. Por áreas o comarcas es muy variable el estudio, por ejemplo la comarca de Icod de los Vinos con el 75,76 % (Gómez-Santos, 2000).

ESTUDIO DE CASOS EN LA MACARONESIA

Caso de estudio en la isla de Terceira (Azores, Portugal)

El objetivo del estudio en esta zona, fue caracterizar el contenido en flúor en el sistema de abastecimiento de aguas en la ciudad de *Praia da Vitória,* en la isla de Terceira, desde la fuente del recurso hídrico subterráneo y, en el suministro urbano.

La isla de Terceira, se encuentra integrada en el archipiélago de las Azores, pertenecientes a Portugal, con una población residente de 246.772 (año 2011). El archipiélago está compuesto por nueve islas volcánicas, situadas en el océano Atlántico. La isla de Terceira con el 22,9% de la población total del archipiélago, 56.437 habitantes, pertenece al grupo central y, se divide en dos zonas administrativas: *Angra do Heroismo* y *Praia de Victoria,* con servicios de suministro de agua y depuración proporcionados por los servicios municipales de sus ayuntamientos.

La isla de Terceira, como en la mayoría de los edificios volcánicos atlánticos, es el resultado de una serie de procesos volcánicos y tectónicos, que incluye una fase proto-insular, caracterizada por erupciones submarinas, que van formando un volcán sumergidos hasta alcanzar la superficie del mar, continuando con una actividad eruptiva subaérea.No se han identificado formaciones y estructuras geológicas de esa primera fase, aunque se admite su presencia, en niveles estratigráficos más profundos. Las formaciones subaéreas corresponden basaltos alcalinos y productos resultantes de su diferenciación (Schmincke, 1972; Schilling, 1975), en particular, hawaiitos, benmoreitos y traquitas de naturaleza comendítica y pantelerítica (Self, 1974).

En *Praia da Victoria,* el sistema de abastecimiento de agua es propiedad del municipio, está operado por una empresa municipal, llamada Praia Ambiente EM. Existen nueve zonas de suministro, en las que el parámetro de contenido en flúor, debe ser monitoreado, al menos, una vez al año, tal y como se define en la Ley 306/2007 del 27 de Agosto, según la normativa portuguesa. En un conjunto de 5 años (2008-2012), el seguimiento de los datos de fluoruro se puede revisar en la (Tabla 1), donde queda patente que, hay un incumplimiento de los parámetros legales en contenido de flúor, en el abastecimiento en *Agualva, São Brás y Vila Nova.*

Tabla 1. Contenido en flúor (mg/L) en el agua de abastecimiento de Praia da Victoria en un periodo de 5 años (2008-2012).

Zona de abastecimiento	Población en 2011 (n.º habitantes)	N (nº de muestras)	Mín. (mg/L)	Máx. (mg/L)	Media (mg/L)	Mediana (mg/L)
Agualva	1432	3	1,7	3,6	2,7	2,8
Biscoitos	1432	7	1,3	1,9	1,5	1,45
Fontinhas	1594	4	0,2	0,2	0,2	0,2
Lajes/Santa Luzia/Juncal	3744	4	0,2	1,9	1	0,9
P.Martins/F.Bastardo/C. Praia	2991	4	0,3	0,5	0,4	0,4
Quatro Ribeiras	394	4	0,3	0,5	0,4	0,4
São Brás	1088	3	1,4	3,4	2,1	1,5
Santa Cruz	6690	9	0,1	1,1	0,45	0,4
Vila Nova	1678	4	1,1	3	1,73	1,4

Por otro lado, las demás zonas estudiadas no muestran grandes cantidades de flúor en el agua de abastecimiento. Según la OMS (2006), hay evidencias que el flúor es un elemento

beneficioso, en cuanto a la prevención de la caries dental. En los casos, que la cantidad de flúor es muy reducida, se podría fluorar el agua de manera artificial, o bien mezclando aguas con mayor contenido de flúor, para poder alcanzar cantidades de este elemento en un rango de 0,5 a 1 mg/L.

La zona de abastecimiento más poblada estudiada, la de *Praia da Vitoria,* presenta una mediana de 0,4 mg/L, lo cual quiere decir que; en un periodo de cinco años, el 50% de las muestras analizadas tenían, menos de esa cantidad de flúor.

Teniendo en cuenta, la cantidad en exceso de flúor, en las tres comunidades rurales (Tabla 1), se estudiaron las fuentes de recursos hídricos, para ese mismo periodo de cinco años, (2005-2012). La Figura 2 presenta el diagrama de cajas para cada fuente de agua, incluyendo: la mediana, los percentiles 25 y 75, así como, los valores máximos y mínimos.

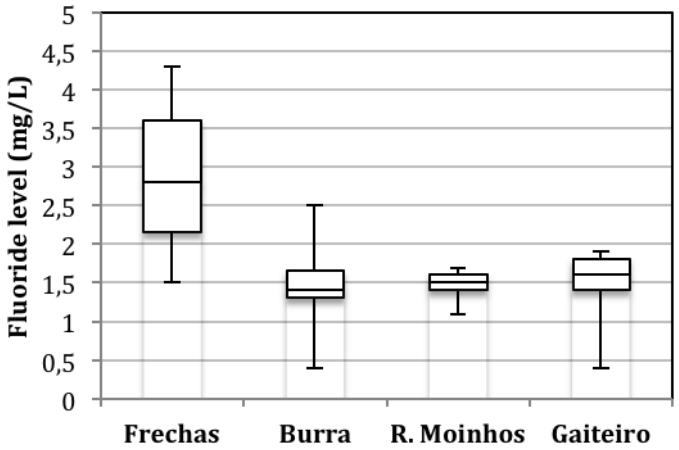


Figura 2. Variación del nivel de flúor, en el periodo comprendido entre 2008 y 2012, en cuatro puntos de abastecimiento

Caso de estudio en la isla de Tenerife (Canarias, España)

La legislación actual española (Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano en España) fija el límite máximo de fluoruro para el agua de abastecimiento público en 1,5 mg/L (valor guía de la OMS) (BOE, 2003).

El flúor se presenta en las explotaciones de Tenerife, debido a dos motivos principales: la sobreexplotación del acuífero basal y, por otro lado, la actividad volcánica residual profunda. En el primer caso, una explotación, no ordenada, de los recursos hídricos subterráneos, mediante galerías —minas horizontales que drenan el acuífero— y pozos, en continuo, sin descanso, durante más de 100 años, ha hecho que muchas explotaciones se sequen, por quedarse por encima del nivel freático. Otras se han reperforado, haciéndose cada vez más profundas, en algunos casos alcanzando más de 5 kilómetros (Santamarta, 2013). Hidrológicamente, no ha dado tiempo a que los recursos se renueven por el agua de lluvia, la cual se infiltra, y parte, llega a ese acuífero en forma de recarga. Por lo tanto, se está extrayendo más recurso, que la capacidad de recarga del acuífero, esto provoca que se extraigan reservas. Las reservas, la forman aguas con altos periodos de residencia —se puede hablar de miles de años—, dentro del acuífero. Esto supone que el agua ha estado en contacto más tiempo con la roca, que la alberga, por lo tanto, hay tiempo suficiente para que se disuelvan más sales, entre las que aparece el floruro de calcio (CaF_2).También, en

Tenerife, dado su origen volcánico, aparece otro factor, que es el CO_2, el cual hace al agua subterránea más agresiva.

También puede aumentar la cantidad de flúor presente en el agua, la aparición del ácido fluorhídrico (HF), asociados a estados de actividad volcánica importantes. Otros gases ácidos son: ácido clorhídrico (HCl), Sulfuro de Hidrógeno (H_2S) y el dióxido de azufre (SO_2). Un ejemplo evidente, es el resultado de un análisis de flúor en el agua, realizado en un sondeo geotérmico en la isla de Terceira, obteniendo una cantidad de 30,1 mg/L.

Aunque el presente estudio se centra en la isla de Tenerife, atendiendo a los estudios llevados a cabo por Gómez Santos (2000), hay que destacar que en Gran Canaria aparecen picos de flúor (mayor de 2,7 mg/L) en *La Aldea de San Nicolás*, entre 1,5 y 2,7 mg/L en *Telde*, en la isla de El Hierro no se supera el límite recomendado, —en el año considerado del estudio—, indicándose numerosas poblaciones de Tenerife donde se superan ampliamente la cantidad de Flúor como; *Icod de los Vinos* o *Buenavista del Norte.*

RESULTADOS, CONCLUSIONES Y VÍAS DE INVESTIGACIÓN ABIERTAS

En el caso de Azores; la media de la concentración de flúor en los recursos hídricos de *Burra*, *Rolo dos Moinhos* y *Gaiteiro* en 5 años (Figura 1) es alrededor de 1,5 mg/L. A pesar de la gran variación en *Burra*, el valor más alto del percentil 75, fue observado en *Gaiteiro*, con 1,8 mg/L. La zona que superó casi todo el tiempo de observación, la cantidad máxima de flúor recomendada fue *Frechas*. El percentil 75 es muy elevado (3,6 mg/L), con valores dentro del rango entre 1,4 mg/L hasta 4,3 mg/L, lo cual significa un patrón regular de alto contenido de flúor en estas aguas.

En el caso de Terceira (Azores), la solución adoptada es la mezcla de aguas. Por un lado, la procedente de los nacientes, —que es la que mayor cantidad de fluoruro tiene—, con el agua procedente de pozos, con lo que se consigue reducir la cantidad final presente. En el caso canario, los nacientes no presentan cantidades elevadas de flúor, a diferencia de las galerías (Tabla 3).

Tabla 2. Media del contenido en Fluoruro (mg/L) en las aguas del municipio de La Guancha (Tenerife), durante el periodo comprendido entre 1976 y 2006 (adaptado de Fernández de Caldas y Hardisson).

Explotación subterránea	Contenido medio en flúor (mg/L)
Vergara	8,97
Fuente Pedro	5,10
El Frontón	4,74
Santa Teresa	4,28
El Pinalete	4,24

En el caso de Canarias, el origen de la contaminación de las explotaciones subterráneas por flúor, es de origen natural (Custodio y Cabrera, 2013). Según el estudio TECNOAGUA (2011), del Gobierno de Canarias, la sobreexplotación del acuífero provocada por el aumento, tanto de la población como de la demanda de agua por parte de esta, ha contribuido extraordinariamente al enriquecimiento de las aguas en sales minerales. Este es el caso de los pozos, que además pueden ver aumentada la concentración de flúor en sus aguas con flúor de origen marino, ya que este elemento está presente de forma natural en el agua de mar. Gran parte de los municipios del norte de la isla de Tenerife excede en la cuantía de flúor permitido, en el agua de abastecimiento (Tabla 3). Aunque no aparece el

municipio de La Laguna, segundo en población de la isla, recientemente se han reportado contenidos elevados de flúor, dado que parte del municipio se abastece, en parte, de aguas procedentes de poblaciones del norte de la isla indicadas en la tabla 3.

Tabla 3. Municipios de Tenerife con aguas con contenidos en flúor > 1,5 mg/L, (adaptado de Hardisson & Reyes, 2003).

Municipio	Nº zonas de abastecimiento	F^- (mg/L)
Buenavista del Norte	8	2,79
Garachico	4	3,00
La Guancha	1	2,60
Icod de los Vinos	7	4,70
La Matanza	3	2,50
San Juan de la Rambla	5	2,42
El Sauzal	6	2,32
El Tanque	4	2,78
La Victoria	4	1,55

Las soluciones planteadas por diversas instituciones, a día de hoy, no son económicamente viables, dado el coste que suponen la instalación de plantas de tratamiento con unos coste energéticos importantes, que hacen, además, generar una mayor dependencia de los combustibles fósiles. La mezcla de aguas cargadas de flúor con aguas con menor contenido, depende de la disponibilidad de estas últimas, además la calidad del conjunto de la mezcla se ve mermada.

Las últimas investigaciones en tratamiento del agua con flúor con minerales de la familia de las Zeolitas con otros materiales, están generando grandes expectativas en relación a la eficiencia en los tratamientos. Los investigadores del CSIC; Díaz, Pérez-Pariente y Gómez-Hortigüela, recientemente (EFE, 2014), junto a la Universidad de Addis Abeba (Etiopía), han patentado un material que reduce los niveles de flúor en el agua, basado en la estilbita (Tabla 4). La estilbita pertenece al grupo de las zeolitas.

La estilbita es un recurso mineral, abundante en Etiopía. En el caso de Canarias, este mineral, vinculado a terrenos volcánicos, aparece en el barranco de Agaete, en la isla de Gran Canaria, pero no en yacimientos, como para ser explotado de la misma manera que el caso Etíope (Santamarta, 2014).

Dado el valor estratégico del agua y su escasez, sobre todo en Canarias, los autores concluyen que es necesaria una mayor inversión e intensificación en los estudios relacionados con el flúor en el agua. Por un lado, desde la parte hidrogeológica, habría que identificar las posibles explotaciones que puedan estar afectadas por la aparición de este elemento y su evolución en el tiempo. Por otro lado, conviene estudiar los efectos del flúor en las poblaciones afectadas, principalmente en los rangos de edades más vulnerables. Finalmente se recomienda abrir nuevas líneas de investigación en materiales, filtros y procesos industriales eficientes y sostenibles que puedan reducir los contenidos en flúor del agua de abasto a precios competitivos.

Tabla 4. Algunos sistemas de tratamiento para aguas con contenido elevado en flúor (adaptado de Hernández, 2006; Heidweiller, 1990; Solsona, 1985).

Método de eliminación	Ventajas	Desventajas	Costes de inversión
Precipitación			
Sulfato de alúmina	Proceso establecido	Se produce fango de proceso. El agua tratada es ácida y con residuos de Al	Medio-alto
Hidróxido de cal	Proceso establecido	Se produce fango de proceso. El agua tratada es alcalina y caústica	Medio-alto
Adsorción/Intercambio iónico			
Carbón activo		Grandes cambios de pH antes y después del tratamiento. Muchas interferencias	Alto
Carbón vegetal	Disponibilidad local	Requiere enjuague con hidróxido potásico	Bajo-Medio
Zeolitas	No específico	Poca capacidad	Alto
Estilbita	Simple sin consumo de recursos energéticos	Depende de la disponibilidad del material	Bajo-Medio
Alúmina activada	Eficaz y proceso establecido	Necesita de operarios	Medio
Membranas			
Electrodiálisis	No específico/ depende tecnología	Remueve otros iones. Operador cualificado	Muy alto
Ósmosis inversa	Depende tecnología	Remueve otros iones. Operador cualificado. Interferencias con la turbidez	Muy alto

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la colaboración de la empresa municipal *Praia Ambiente*, por la colaboración en el suministro de datos sobre la calidad de aguas de suministro.

REFERENCIAS

BOE (2003). *Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios para la calidad de las aguas destinadas al consumo humano.* (BOE Nº 45 de 21 de febrero de 2003, 7228-7245).

Camargo, J.A. (2003). *Fluoride toxicity to aquatic organism: a review.* Chemosphere 50(3): 251-264.

Custodio E., Cabrera, M.C. (2013). Métodos de estudio hidrogeológicos e hidrogeoquímicos, en *Hidrología y Recursos Hídricos en Islas y Terrenos Volcánicos*, (Santamarta, J.C., ed.) Colegio de Ingenieros de Montes: Madrid. 556 pp.

EFE (2013). El CSIC halla en un mineral etíope la base para eliminar el flúor del agua. Agencia EFE. Recuperado el 9 de abril http://www.efefuturo.com/noticia/un-mineral-etiope-tiene-la-base-para-eliminar-el-fluor-del-agua/

Fernández-Caldas, E. y Pérez- García, V. (1974). *Características químicas de las aguas subterráneas de las islas Canarias occidentales*. Centro de Edafología y Biología Aplicada de Tenerife (Consejo Superior de Investigaciones Científicas), Aula de Cultura de Tenerife, Santa Cruz de Tenerife: 67-71.

Frencken, J.E. (editor) (1992). *Endemic Fluorosis in developing countries, causes, effects and possible solutions*. Publication number 91.082, NIPG-TNO, Leiden, The Netherlands.

Gómez Santos G. (2000). *II Estudio Epidemiológico de la Salud Bucodental Infantil en Canarias. 1998. Santa Cruz de Tenerife*: Dirección General de Salud Pública, Servicio Canario de Salud, Consejería de Sanidad y Consumo.

Gobierno de Canarias (2011). Informe Tecnoagua: Evaluación de Tecnologías Potenciales de Reducción de la Contaminación de las Aguas de Canarias. Universidad de La Laguna, pp. 266.

Hardisson De La Torre, A. y Reyes Jorge, J.P. (2003) *Estudio de los contenidos en ion fluoruro en dos zonas endémicas de fluorosis dental en las Islas Canarias*. Alimentaria, Noviembre: 43-48.

Heidweiller, V. M. L. (1990). *Fluoride removal methods. In: Proc. Symposium on Endemic Fluorosis in Developing Countries: Causes, Effects and Possible Solutions*, ed: Frencken, J. E., Chapter 6, NIPG-TNO, Leiden, 51-85.

Hernández Suárez, M. (2006). *El flúor en cifras: límites para le consumo y métodos de eliminación.* El Manantial 33. Fundación Centro Canario del Agua. Tenerife. 1-4.

Schilling, J.G., (1975). *Azores Mantle Blob: Rare-Earth evidence*. Earth and Planetary Science Letters, 25:103-115.

Schmincke, Hans-Ulrich e Wiebel, M., (1972). *Chemical study of rocks from Madeira, Porto Santo and São Miguel and Terceira (Azores)*. N. Jarbuch F. Mineralogie Abhandlugen B.D., 117(3): 253-281.

Self, S., (1974). Recent volcanism on Terceira, Azores. PhD thesis. London University, Imperial College.

Santamarta J.C. et al. (2013). *Hidrología y Recursos Hídricos en Islas y Terrenos Volcánicos*, Colegio de Ingenieros de Montes: Madrid. 556 pp.

Santamarta J. C. (2014). *Ingeniería Minera de los Recursos Hídricos en Islas Oceánicas.* Inédito, en revisión. Madrid. 502 pp.

Solsona, F. (1985). *Water defluoridation in the Rift Valley*, Ethiopia. UNICEF.Technical Report, Addis Ababa, 27 pp.

WHO (2011). *Guidelines for drinking-water quality*. 4th edition. WHO Library Cataloguing-in-Publication Data.

ISBN: 978-84-938046-4-0

LA FUENTE PÚBLICA DE TELDE

Juan Ismael SANTANA RAMÍREZ[1]

[1]Casa-Museo León y Castillo. 35200. jisantanar@grancanaria.com

RESUMEN

Las fuentes públicas constituyen uno de los bienes patrimoniales más cercanos de la arquitectura del agua integradas en la historia y en la vida de nuestro entorno, pues están asociadas a la memoria de cada lugar. Sin embargo, la fragilidad que le es inherente, los desperfectos, el desgaste continuo o el desuso que se hace de estos bienes culturales por haber perdido protagonismo como proveedores de agua, están provocando su desaparición. Este trabajo pretende, por un lado, acercar el estudio y el conocimiento de La Fuente Pública de Telde, como interesante muestra de la ingeniería y la cultura tradicional asociada a los usos del agua, analizando los factores que propiciaron la pérdida de un bien tan estimado en el siglo XIX, y las actuaciones llevadas a cabo por la municipalidad para intentar recuperar el preciado líquido. De otro, llamar la atención sobre la importancia que tiene para los pueblos la defensa del patrimonio hidráulico, que siempre fue motivo de valoración social, de vida, y hoy es víctima del deterioro, el desinterés y la incultura por parte de responsables sociales y el público en general.

Palabras clave: *fuete pública, patrimonio hidráulico, Telde (Gran Canaria).*

ABSTRACT

Public springs are one of the closest properties to the architecture of water, integrated into the story and the lives of our environment, as they are associated with the memory of every place. However, the fragility, which is inherent, defect and continuous wear or disuse, which make these cultural goods having lost their role as water providers, are causing their disappearance. This article aims, firstly, to bring the study and knowledge of the Public Spring of Telde as an interesting sample of engineering and traditional culture associated with the use of water, as estimated by analyzing the factors that contribute to the loss of a good in the nineteenth century, and the actions taken by the city to try to recover the precious liquid. It is also interesting the importance of the defense of the hydraulic heritage by people, which was always a cause ofsocial value, life, and today is a victim of damage, disinterest and ignorance by social workers in charge and people.

Key words: *public spring, hydraulic patrimony, Telde (Gran Canaria).*

CONDICIONANTES GEOGRÁFICOS E HIDROLÓGICOS.

La ciudad de Telde, situada al este de la isla de Gran Canaria, a una altitud de 130 metros sobre el nivel del mar y localizada entre los 28º00' N y 15º 24' O, presenta una

posición que domina una extensa zona, en suave desnivel hacia la costa y a orilla del Barranco Real. Se caracteriza por presentar un clima suave, de fuerte insolación, de temperaturas moderadas y escasez de precipitaciones debido fundamentalmente a la influencia de los vientos alisios húmedos que penetran por la vertiente noreste, y la proximidad del mar.

Geológicamente, el casco urbano y su entorno se asienta sobre una plataforma lávica, formada por materiales basálticos procedentes de los ciclos eruptivos más recientes, que se cubren superficialmente por depósitos cuaternarios naturales o antrópicos, determinando la existencia en el pasado de una zona de gran aprovechamiento agrícola en torno a la Vega Mayor, e hidrológica, vinculada a la potencialidad que ofrece el Barranco Real de Telde, erigiéndose éste en la principal arteria de drenaje de una de las mayores cuencas hidrográficas en torno al circo-caldera de Tenteniguada, en Valsequillo. Determinados rasgos hidrogeológicos han sido los causantes de esta riqueza hídrica. Los materiales volcánicos, procedentes de los ciclos eruptivos más recientes, actúan como un auténtico filtro natural que condicionan la presencia de una rica capa freática, y que aunado a la *infiltración* subyacente han permitido el flujo de aguas subterráneas desde la zona de cumbres y recarga hacia la costa[1], posibilitando el afloramiento de surgencias naturales en sus declives, ya fuese en los cauces y costados de barrancos o en la orilla del mar.

LA FUENTE PÚBLICA DE TELDE

Las primeras noticias documentales de la existencia de la fuente, datan de principios del siglo XVI, pues en enero de 1500 se verifica la puesta en riego de *suertes de tierras en la Vega de la Fuente*, topónimo que corrobora la explotación ya en esa época de este importante venero de agua y que da nombre al pequeño valle que se extiende a sus pies.

Se trataba de un manantial natural, una *fuente de copiosa agua dulce y saludable*[2]*,* como ya la describiera Marín y Cubas a finales del siglo XVII, que brotaba en el callejón de La Fuente del actual barrio de San Francisco, lugar tradicional de encuentro del vecindario para su acopio.

Un siglo antes dio cuenta de esta *fontana* el ingeniero cremonés Leonardo Torriani, plasmando su ubicación en el plano que hizo de Telde hacia 1592. Su emplazamiento en la cabecera de un pequeño valle plantado de cañaverales y viñas próximo a un ingenio azucarero propiedad de Alonso de Matos, deriva del propio carácter funcional para uso doméstico y aprovechamiento del sobrante en los riegos del Valle de la Fuente y suertes de tierras cercanas. Su origen se puede remontar a los repartimientos de tierras y aguas o cuando menos haber tenido un aprovechamiento prehispánico y posterior reutilización. Es elocuente al respecto, la importancia que concedió Pedro Agustín del Castillo al manantial en la creación del núcleo urbano, *por haberse descubierto después a un tiro de mosquete más abajo una abundante y perenne fuente, lo prosiguió Cristóbal García del Castillo, en el paraje que ha crecido su población*[3]*.*

Fuese así o no, lo cierto constituyó probablemente la base del primer sistema de abastecimiento al núcleo poblacional de Telde, resolviendo además los problemas de insalubridad que ofrecían las aguas procedentes del barranco en diversas situaciones.

---

[1] CABRERA SANTANA, María del Carmen: *Caracterización y funcionamiento hidrogeológico del acuífero costero de Telde (Gran Canaria).* Tesis doctoral. Universidad de Salamanca. 1995.

[2] ARIAS MARÍN DE CUBAS, Tomás: *Historia de las Siete Islas de Canaria.* Real Sociedad Económica de Amigos del País de Las Palmas, Las Palmas de Gran Canaria, (1687,1986), p. 264.

[3] CASTILLO, Pedro Agustín, del*: Descripción histórica y geográfica de las islas de Canaria,* Las Palmas de Gran Canaria, (1773, 2001), pp. 203-204.

El manantial surgió, debido a la afluencia de veneros al pie del estrato volcánico sobre el que se asienta el barrio, adscrito a una fuente de afloramiento de pendiente, con emergencia de la capa acuífera en la parte más baja, debido a su menor nivel topográfico con respecto a su punto de captación, probablemente en dirección oeste, hacia el Barranco Real.

Estas características hidrológicas determinaron la existencia de un caudal intermitente, sujeto a las oscilaciones propias del régimen de lluvias, y por tanto, de los aportes de aguas subálveas (Tabla 1), lo que obligó en diversas ocasiones a realizar obras de alumbramiento con el fin de aumentar el volumen de agua, bien por colapso del terreno, agotamiento por sobreexplotación del acuífero o sequías. Ocurrió así en 1815, cuando La Fuente llegó a secarse en su totalidad; en 1816, año en que se notó una merma considerable de agua como consecuencia de haber tomado *distinto giro* y *no salían todos los remanentes á la superficie del terreno,* siendo *preciso profundizar las asequias* o hacia 1870, fecha en que el Heredamiento del Valle de la Fuente propone a la municipalidad trabajos de explotación para aumentar el caudal.

Tabla 1. Caudal aproximado de la Fuente Pública de Telde (S. XIX).

INFORMACIÓN	AÑOS	AFOROS	L/S
Informe del Ayuntamiento de Telde (1)	1849	3/4 de azada	9,2 l/s
Pascual Madoz (2)	1850	27-30.000 pies cúbicos entre día y noche	9,3 l/s
Domingo Déniz Grek (3)	1857	1/6 de azada	9,8 l/s
Juan de León y Castillo (4)	1869-1872	1.000 pipas cada 12 horas	11,1 l/s
Francisco de La Torre y Sarmiento (4)	1872	666 pipas y 2/3 en 24 horas	3, 7 l/s

Elaboración propia.
Fuentes: (1) ARCHIVO MUNICIPAL DE TELDE. Sesión plenaria de 19-III-1849; (2) MADOZ, P. 1986; (3) DÉNIZ GREK, D. 1857; (4) GACETA DE MADRID, nº 309, 5 de noviembre de 1879.

La captación del agua se realizó mediante *mina*[4] o galería subterránea, sin longitud precisa, excavada en la capa volcánica. Su trazado, al parecer, fue de una única galería que según el erudito local Pedro Hernández Benítez, se orientaba al Altozano, es decir, en dirección oeste. No obstante, dado que el agua proviene de un acuífero situado con mayor capacidad (Barranco Real) hacia el poniente, no se puede descartar la posible existencia de galerías o ramales transversales a la principal, que ayudaran a una mayor captación de agua.

Es muy posible que la existencia de la presa de derivación o azud contribuyera a aumentar la infiltración, beneficiándose no sólo el acuífero del que se surtía La Fuente, sino determinadas actividades agroartesanales, como el lavado de fibras textiles, el *"enriado del lino",* el cáñamo o el remojo de pieles, que aprovechaban las aguas estancadas de charcos o balsas en el cauce, en determinadas épocas del año, con el consiguiente riesgo por sus efectos contaminantes sobre el agua de uso doméstico.

Dicho minado permitió profundizar para ampliar el caudal, fabricándose en su interior una acequia de argamasa que transportaba el agua hacia el exterior, en suave aunque variable pendiente, para ser distribuida por los seis caños que tenía la fuente. Conocemos

[4] En materia hidráulica esta galería de captación no responde por su tipología a una estructura llamada genéricamente en Canarias como "mina" o "minado". Para el caso que nos ocupa nos referimos a una *galería* convencional excavada en la toba volcánica, aunque empleemos el término "mina" por ser el que aparece de continuo en las noticias documentales.

que tuvo un dispositivo de decantación para filtrar y contener arena, a modo de *caja* o *arca* instalada en el interior de la conducción, así como de almacenamiento mediante *albercón* o estanque situado en la trasera de la calle Real, hoy Juan Carlos I, colindante con La Vega de La Fuente, pero la documentación no aclara el sistema de desagüe y evacuación del agua o si tuvo lavaderos y abrevaderos asociados en algún momento.

El acceso a la galería, necesario para la inspección de la canalización, se encontraba aledaño a los restos actuales de la Fuente, como se observa en la fotografía fechada en 1905, en la que se aprecia una pequeña puerta enmarcada en cantería.

Para llegar a la Fuente Pública se descendía por una grada o escalera, hoy desaparecida, que permitía el acceso y la espera para sacar lo necesario al uso doméstico, debido al desnivel existente entre la calle y la profundidad a la que se encontraba la salida del agua.

En su origen debió tratarse de una construcción relativamente sencilla, a lo sumo formada por un depósito de decantación y pilón con su correspondiente dispositivo de salida que permitía el vaciado o rebosamiento del agua, para destinar su sobrante bien directamente al riego de las huertas cercanas o su distribución posterior, previo almacenamiento en estanque regulador, pues no hay que olvidar que una vez saciado el vecindario se formaba un heredamiento privado que gestionaba el preciado recurso, para fertilizar el espacio de irrigación de la llamada Vega de La Fuente. Por tanto, su construcción fue lógica consecuencia del auge económico experimentado por el cultivo del azúcar y el aumento poblacional a partir del asentamiento colonizador.

LA SECA DE LA FUENTE

A mediados del siglo XIX, la imagen que ofrecía Telde no difería de la de siglos anteriores. La población, de base rural, estaba sujeta a los designios que la naturaleza imponía, dispersa en diversos pagos y caseríos, a excepción de los barrios de San Juan, San Francisco y Los Llanos, núcleos éstos rodeados por un espacio de regadío llamado Vega Mayor.

La amenaza casi constante de perder la única fuente de agua potable con la que contaba la población se puso de manifiesto en la época, no sólo por los estragos que pudieran causar las sequías y temporales que se sucedieron en un corto periodo de tiempo, sino por la irrupción de la iniciativa privada en la explotación del agua subterránea, íntimamente relacionada con la expansión del regadío y la demanda hídrica generada por el cultivo de la cochinilla, consecuencia directa de la implantación del nuevo modelo económico basado en el *puertofranquismo*, impulsor del capitalismo agrario de exportación. Por tanto, se asistió a un cambio en la estructura de la propiedad del agua y su gradual privatización a raíz del proceso desamortizador y la reforma agraria liberal, que influyó en la legislación hidráulica de la época: Ley de aguas de 3-VIII-1866 y el Decreto-ley de minas de 29-XII-1868.

En este contexto, el agua de la Fuente Pública de Telde, al igual que ocurrió con las de El Chorro, no tardarían en verse afectadas. Entre 1847 y 1871 se constata el interés de una parte de los propietarios más destacados y particulares por explotar aguas subterráneas cercanas al manantial, lo que evidencia la gran riqueza acuífera de la zona.

En 1847 y 1866 el Ayuntamiento de Telde, se opuso a los trabajos de alumbramiento solicitados por Agustín Manrique de Lara y Castillo, quien afirmaba corresponderle *la*

propiedad exclusiva de las aguas y remanentes de la fuente del medio, dentro de la huerta del manantial que posee consistente en media azada de agua perpetua... [5].

Lo mismo sucedió en 1869 y 1871 cuando el Heredamiento de Aguas de la Vega Mayor y la Alcaldía se resistieron a ciertas explotaciones de aguas en el barranco de Telde, promovidas por Rosa Socorro Pérez y el ingeniero Juan de León y Castillo, en el lomo de El Roque y Las Tenerías, entre el Puente de Tara y la presa de derivación de las aguas de la citada entidad.

La Comisión designada por la Heredad, formada por José Mª Naranjo, Agustín Castro y José Rodríguez Bravo fundó su negativa en el *error tal vez involuntario* en que incurría la memoria presentada, al afirmar que el agua desde la presa de derivación de la Heredad hacia abajo *no las utiliza dcha. Heredad ni le pertenecen,* lo que según los informantes, atentaría contra los *derechos de propiedad é intereses que esta corporación no está en el caso de ceder ni permitir que se vulneran por nadie*[6]. Por esta razón consideraron que la pretendida concesión sólo podría otorgarse guardando la distancia de cien metros como mínimo de la acequia de la Heredad, como exigía la Ley de Aguas de 1866, sin perjuicio de los trabajos que la Comunidad de Regantes quisiera ejecutar en cualquier tiempo.

Este informe desfavorable para los intereses de Juan de León y Castillo, le hizo presentar su dimisión como Presidente de la Junta Directiva de la Heredad de Aguas, *sin que por esto deje de estar dispuesto a esa Junta de los servicios que crea necesarios y estén en mis facultades*[7]. Esta contrariedad, no impidió que el técnico prosiguiera con sus planes, pues en 1871 presentó en la sección de Fomento del Gobierno de la Provincia dos solicitudes pidiendo 11 pertenencias mineras en el Valle de la Fuente, a partir de la boca de la mina del Alcaravanal, así como en los valles de Tara, Herradura y Cantera. Pretensiones que fueron correspondidas años después al aparecer como titular de la *Mina de la Herradura*: *compuesta por una galería para captación de las aguas que principiando en el barranco de Telde, bajo el puente de Tara donde llaman Tenerías, atraviesa el subsuelo de la finca llamada del lomo… El agua producto de esta explotación se dirije por una acequia de mampostería hasta el estanque situado en la Placetilla…* [8]

Precisamente en el subsuelo de ese lugar, junto al camino de San Antonio, el ingeniero de montes Francisco Romero Cerdeña, en nombre de su hermano Fernando, proyectó en julio de 1870 una galería que pasaría *por debajo de la superficie de lo arruado de la Ciudad*, atravesando la cuenca del Valle de la Fuente hasta llegar al Barranco[9], encontrando la protesta de los munícipes, que en diciembre de 1869 ya habían instruido expediente de denuncia contra unas obras que pretendía ejecutar Rosa Socorro Pérez, viuda del que fuera secretario municipal y de la Heredad de la Vega Mayor, Sebastián Millán por amenazar las aguas de la fuente pública.

Lo cierto es que en julio de 1869, y sobre todo a partir de los trabajos de perforación iniciados por dicha señora en el mes de septiembre siguiente, en cota superior a la galería de la fuente pública, logrando alcanzar el venero 15 días después, el caudal de la fuente

5 A. M. T.: Acta de Sesión Plenaria 15-VII-1866, fol.11r.
6 A.C.R.V.M.T.: Expedientes de oposición a obras hidráulicas. Mina de las Tenerías. *Informe de la comisión designada sobre las aguas de explotación de aguas solicitada por Juan de León y Castillo*. Telde, 23 de septiembre de 1869, fol. 1v.
7 Ibídem, …, *Comunicación de Juan de León y Castillo a la Heredad de Aguas de la Vega Mayor de Telde*. Telde, 3 de agosto de 1869.
8 A.C.R.V.M.T.: Escrituras de propiedad. Copia mecanografiada de escritura de propiedad de la Mina de La Herradura, 1950.
9 BOPC, núm. 82, de 13 de julio de 1870.

disminuyó progresivamente hasta desaparecer por completo durante aquel invierno. Según testimonio del perito y maestro de obras Francisco de La Torre Sarmiento, el 10 de diciembre de 1870, *varios vecinos observaron que repentinamente comenzó a correr la fuente por todos sus caños a las nueve de la mañana; siguió creciendo hasta las doce, disminuyó después y dejó de correr a las oraciones del mismo día,* lo que según el Ayuntamiento, se relacionaría con el derrumbamiento de los túneles de Rosa Socorro[10], consumándose de esta forma la privatización de un bien público.

Por las mismas fechas se confirma la necesidad de afrontar obras que ampliasen el caudal de la Fuente. Y así lo propone el Heredamiento del Valle de la Fuente, beneficiario de los sobrantes de la misma, alegando la Corporación local, la carencia de recursos para contribuir a tal objeto ya que *la Fuente daba el agua necesaria para el abasto público, sin que hasta la fecha haya faltado, pues más bien hay sobrantes que provendrán los regantes del heredamiento, según el uso establecido,* no oponiéndose por tanto a tales trabajos *con la garantía de que no se amengüe ni distraiga el caudal existente*.

Los peores presagios se confirmaron en agosto de 1871, cuando el alcalde accidental, Felipe Naranjo, comunicó que *la Fuente Pública no daba ya agua para el abasto del vecindario por estar muy seca; y como el cuerpo tenía acordado que hasta que hubiese agua para el consumo público no tomaría determinación sobre el particular, creía su deber participar en un asunto de tanta entidad para el público.* Abierta discusión, el Síndico del Común, Antonio Ramos, sugirió hacer un llamamiento a los mayores contribuyentes para tomar la determinación más conveniente, contestando el Sr. Naranjo ser innecesario tal llamamiento *en razón a que el Ayuntamiento era el representante legal y único administrador legal de los intereses del vecindario*.

La actitud del Ayuntamiento revela, a nuestro juicio, cierta pasividad y falta de previsión en velar por un bien común tan necesario, quizás derivado de su propia incapacidad, o de los intereses de muchos de sus miembros con estrechos lazos socio-económicos que participaban del negocio del agua, como se puso de manifiesto en el control de las aguas de El Chorro por aquellos años.

La situación para el vecindario no pudo ser peor, al verse privado de un recurso básico y de calidad, lo que podía ser causa de un conflicto público, si con las avenidas del barranco se enturbiaba el agua de las acequias de El Chorro, única alternativa al abastecimiento, o si éstas venían sucias y reducidas en los meses estivales.

LA DEFENSA JURÍDICA Y LA PÉRDIDA DE UN BIEN PÚBLICO

Consumado el hecho, la actividad del Ayuntamiento se orientó a la defensa jurídica de sus intereses, al igual que hicieron los partícipes de la Heredad del Valle de La Fuente, quienes interpusieron interdicto contra Rosa Socorro Pérez por la merma del agua pública. Para ello contrataron los servicios de Manuel Alonso Martínez, abogado en Madrid, y del jurista Antonio López Botas. Este último, estimó conveniente formar expediente con inclusión de memoria y plano de todos los antecedentes de la Fuente, participando en este menester el maestro de obras Francisco de la Torre Sarmiento y algunos *vecinos ancianos y de honradez que hubiesen visto practicar las obras antiguas de las mismas obras,* así como el nombramiento de una comisión mixta entre Ayuntamiento y Heredad del Valle de La Fuente.

[10] Gaceta de Madrid, núm. 309, de 5 de noviembre de 1879. p. 367.

A partir de ese momento se produce una batalla legal entre el Consistorio y la denunciada, cuya cronología exponemos de forma resumida, y que se prolongó hasta 1879.

En julio de 1872, el Ayuntamiento presentó escrito de denuncia, dirigido al subgobernador, solicitando la paralización de las obras, el reconocimiento de las mismas por peritos nombrados por las partes y la restitución con indemnización de todos los daños y perjuicios causados durante el tiempo que las aguas estuvieron cortadas y distraídas. La petición del Consistorio teldense incluía represar las aguas de la denunciada en la boca de la galería de desahogo, para ver si las aguas volvían a tomar su antiguo curso y brotaban de nuevo en la fuente del abasto público.

El Subgobernador de Gran Canaria, en providencia de 21 de septiembre de 1872 resuelve no ser competente en la cuestión, argumentando no haber presentado el Ayuntamiento oposición en tiempo debido y lo que se cuestionaba por el Ayuntamiento era la propiedad de un derecho adquirido con anterioridad á la publicación de la Ley de Aguas, y en este estado la Administración no podía entender en la reclamación de la Municipalidad por ser relativa al dominio de aguas, cuestión reservada a los Tribunales de justicia. La reacción del Ayuntamiento fue la interposición de un recurso de alzada que fructificó en la Orden de 11 de octubre de 1873 dictada por el Gobierno de la República, previo dictamen de la Junta Superior facultativa y comisión del Consejo de Estado, dando vía libre a las pretensiones de la Corporación local.

Este triunfo momentáneo para la municipalidad fue ratificado en sucesivas resoluciones administrativas, impugnaciones, sentencias judiciales y reales órdenes, ante las que se interpusieron los correspondientes recursos.

La situación empezó a cambiar a partir de la Real Orden de 12 de enero de 1877, que declaró la vía contencioso-administrativa, solicitada una vez más por Pedro Pablo Ayuso, representante legal de Rosa Socorro. Éste amplió la demanda, solicitando que se declarase finalizada la cuestión *en el orden gubernativo*, considerando en consecuencia que lo que se trataba de dirimir entraba dentro del dominio de las *aguas privadas*. Es precisamente en el cambio de consideración jurídica de la titularidad del agua (de pública a *privada*), donde reside el eje central de la cuestión y por el que se pretende la prescripción de todas las actuaciones.

El informe realizado a instancias del Ministerio de Fomento por el Ingeniero de Minas del Distrito, José Margarit y Coll, el 20 de agosto de 1878, fue clave para el fallo definitivo, del que extractamos las siguientes apreciaciones: 1º). "*La situación topográfica de la galería de las aguas de Rosa Socorro es distinta de la Fuente Pública.* 2º). *Que la capa de terreno en que se han efectuado las obras de explotación es distinta e inferior, estratigráficamente considerada, a aquella en que surgía el manantial de la fuente pública de Telde, hallándose en éste último punto 6 metros por lo menos más baja que el nivel de los chorros de dicha fuente; deduciéndose que las labores efectuadas por Doña Rosa Socorro en su propiedad no han producido ni podrían producir el agotamiento de la fuente pública, habiendo dos años que la galería de las aguas de Doña Rosa se hallaba tapiada, continuando seca la fuente.*

En consecuencia, la Sala de lo Contencioso Administrativo del Consejo de Estado, en Real Decreto de 23 de septiembre de 1879, resolvió: *dejar sin efecto la Real orden impugnada de 30 de junio de 1876; en declarar que a Doña Rosa Socorro Pérez de Millán asiste el derecho a utilizar las aguas por ella descubierta en la finca de su propiedad (…) y en condenar al Ayuntamiento de la ciudad de este nombre a respetar el uso de ese mismo derecho, y a reponer a sus expensas las obras de la interesada*[11].

[11] Ibídem, p. 369.

Años más tarde los herederos de Rosa Socorro Pérez aparecen asociados con Juan de León y Castillo explotando las aguas objeto de la discordia.

CONCLUSIÓN

Hasta la segunda mitad del siglo XIX, la importancia que tuvo el sistema hidráulico de La Fuente Pública de Telde es notoria en el abastecimiento de agua al núcleo poblacional, aunque éste se caracterizase por su limitación, pues las soluciones técnicas aplicadas estaban relacionadas con el nivel de recursos naturales, la situación geográfica, que determinaba la captación, el transporte y distribución del agua o el estado de la hacienda municipal.

Nos encontramos pues, ante una sociedad agraria, que manifiesta caracteres propios del Antiguo Régimen, en el uso y prácticas asociadas al agua, pero que asiste a las transformaciones que se operan en el plano económico, como es el fenómeno de la privatización del subsuelo hídrico, mediante las licencias otorgadas a particulares para abrir minas y galerías, afectando de lleno a las corrientes de aguas subterráneas que alimentaba a La Fuente Pública. Este factor vino a demostrar una vez más como el bien particular prevaleció sobre el bien público.

Rescatar del olvido este símbolo de la sociabilidad colectiva debe ser nuestro compromiso, saldando una deuda histórica con uno de los elementos más valorados por nuestros antepasados, al resolver una necesidad vital y fundamento de su propia existencia. Su integración en el presente debe contar con especialistas en distintas áreas del conocimiento que devuelvan, en la medida de lo posible el esplendor de antaño, en el marco de un proyecto social de recrear lugar, acometiendo actuaciones en materia de conservación y sensibilización del Patrimonio, en el contexto de un plan mucho más amplio de uso y gestión del Conjunto Histórico-Artístico de los barrios de San Juan y San Francisco de la ciudad de Telde.

REFERENCIAS

Archivo de la Comunidad de Regantes de la Vega Mayor de Telde (A.C.R.V.M.T.)

Archivo Municipal de Telde (A.M.T.)

Boletín Oficial de la Provincia de Canarias, núm. 82, de 13 de julio de 1870.

Cabrera. M.C. 1995. *Caracterización y funcionamiento hidrogeológico del acuífero costero de Telde (Gran Canaria).* Tesis doctoral. Universidad de Salamanca.

Gaceta de Madrid. núm. 309, de 5 de noviembre de 1879. p. 367.

Hernández Benítez, P. (1958). *Telde, (sus valores arqueológicos, históricos, artísticos y religiosos).* M. I. Ayuntamiento de Telde, Telde. 264 pp.

Macías Hernández, A. y Ojeda Cabrera M. (1989). “Acerca de la revolución burguesa y su Reforma Agraria. La Desamortización del agua”. En *Anuario de Estudios Atlánticos*, nº 35, Las Palmas-Madrid, 217-263.

Santana Ramírez, J.(2006). “La Fuente de Telde: recuperación de un patrimonio hidráulico”, en *El Pajar. Cuaderno de Etnografía Canaria*, núm. 22, II Época, 90-96.

Suárez Moreno, F. (2002). “Las minas de agua en Canarias”, en Palerm Viqueira, J. (Ed). *Antología sobre pequeño riego. Sistemas de riego no convencionales*. Colegio de Postgraduados, México, vol. III, 291-323

ISBN: 978-84-938046-4-0

EL DESCUBRIMIENTO Y LA RECUPERACIÓN DE LA FUENTE SANTA EN LA ISLA DE LA PALMA

Carlos SOLER LICERAS[1], Miguel Ángel SICILIA DE PAZ[2], Miriam HERNÁNDEZ ABRÉU[3]

[1] Área de Aguas del Gobierno de Canarias. carlossolerliceras@gmail.com
[2] Dirección General de Tributos. miguesicilia@gmail.com
[3] Área de Aguas del Gobierno de Canarias. miriamhernandezandreu@gmail.com

RESUMEN

La Fuente Santa era un manantial termal que brotaba al sur de la isla de La Palma. La fama curativa de sus aguas atrajo a grandes e insignes viajeros de Europa y América que, con sus dádivas, hicieron que durante los siglos XVI y XVII la isla alcanzara la mayor renta per cápita de Canarias. En 1677 la erupción del volcán de San Antonio sepultó la fuente y la isla cayó en la desesperación. En el lugar donde antaño brotaba, había ahora un malpaís que cambió tanto el paisaje que logró que se perdiera toda referencia del lugar donde surgía. Durante los tres siglos siguientes no hubo generación de palmeros que no intentasen encontrarla. Intervinieron en su búsqueda grandes sabios y científicos, tanto canarios como del continente europeo. En 2005 y gracias a la unión de cuatro ciencias: Historia, Geología, Química e Ingeniería, los ingenieros que suscriben desenterraron la mítica Fuente Santa, mediante una obra realmente singular. Después de analizadas las aguas, al fin se ha comprendido lo justificado de su fama: las aguas son cloruradas sódicas carbogaseosas, lo que las convierte en únicas a nivel de España y las mejores de Europa, donde únicamente pueden encontrarse en Vichy y Nuanheim.

Palabras clave: *Manantial Termal, clorurada sódica carbogaseosa.*

ABSTRACT

The Fuente Santa was a warm spring that flowed south of the island of La Palma. The fame of its curative waters attracted large and distinguished travelers from Europe and America, with its gifts made during the sixteenth and seventeenth centuries the island reached the highest per capita income in the Canaries. In 1677 the eruption of San Antonio buried the source and the island fell into despair. In the place where once flowed, was now a badlands that changed both the landscape got any reference of where arose was lost. Over the next three centuries there were palm generation not to try to find her. Participating in your search great sages and scientists, both canaries as the European continent. In 2005, thanks to the union of four sciences: History, Geology, Chemistry and Engineering, engineers subscribing unearthed the mythical Fuente Santa, through a truly unique work. After analyzed the waters finally understood what has justified its reputation: the water is chlorinated carbogaseosas sodium, making them unique level in Spain and the best in Europe, which only can be found in Vichy and Nuanheim.

Keywords: Hot Spring, carbogaseosa sodium chlorinated.

INTRODUCCIÓN

En 1493, tras la conquista de la isla por Don Alonso Fernández de Lugo, se procedió al reparto de aguas y tierras entre los conquistadores. A los benahoritas se les condenó a emigrar al sur de la isla, aquella parte donde la isla era más estéril. Pronto se dieron cuenta los nuevos colonizadores que los antiguos, aunque relegados a la zona más pobre, tenían allí un manantial termal que denominaban Tagragito que era famoso entre ellos por sus propiedades curativas. Los españoles conocieron sus virtudes y bautizaron al manantial con la traducción literal del nombre aborigen: Fuente Caliente y así dio lugar al topónimo de Fuencaliente con el que se conoce hasta hoy la punta sur de la isla de La Palma.

Figura 1 Situación General

La fuente nacía en una playa de callaos que se situaba al pie de un acantilado costero de 150 metros de altura y lo hacía en forma de dos charcas mareales que posteriormente fueron bautizadas con los nombres de san Lorenzo, la más caliente y más próxima al acantilado, y la de san Blas, menos caliente y más cercana a la orilla del mar (Fig 2). Por encima del acantilado se extendía hacia el norte una meseta con una ligera pendiente, la Cuesta de Cansado, que terminaba en tres grandes montañas que la coronaban de las cuales la central, la más alta, se conocía como la Montaña de Los Corrales. En esta Cuesta de Cansado existía un poblado llamado por los españoles Los Canarios por ser el mayor asentamiento fijo de los benahoritas.

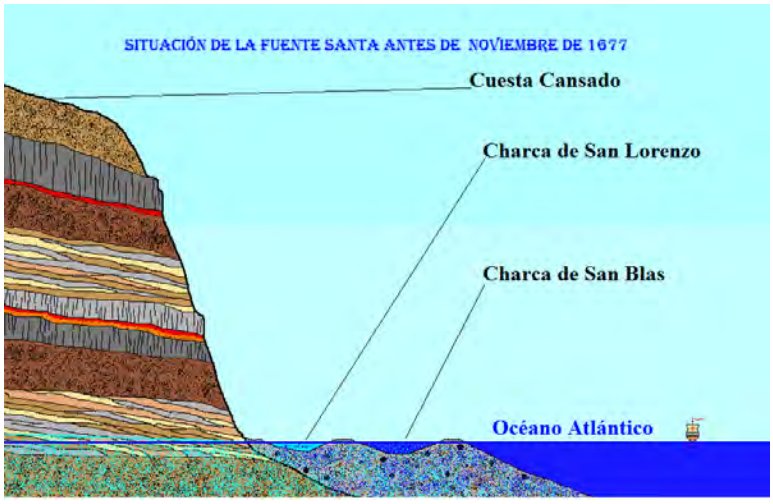


Figura 2 Perfil de la costa antes de 1677

Rápidamente la fama de las curaciones que generaba la Fuente Caliente se extendieron por toda la cristiandad. Tan solo cuarenta años después de conquistada la isla esta fama llega a la corte itinerante del Emperador Carlos I donde se contaba que la fuente curaba la lepra, la sífilis, el reuma, la artrosis y cualquier enfermedad relacionada con la circulación sanguínea o linfática. Grandes personajes visitaron y se curaron en la Fuente Caliente, entre ellos cabe citar a don Pedro de Mendoza y Luján, Álvar Núñez Cabeza de Vaca, Fray Gaspar Frutuoso, Fray Juan de Abreu Galindo, etc.

A lo largo del siglo XVII se produce la mayor fama de la fuente. Los enfermos venían de Europa y América, el agua se transportaba en toneles hasta Cuba y Amberes. Y todo ello hizo que la isla de La Palma tuviera la mayor renta per cápita del archipiélago. Se fundó un pueblo en las proximidades del manantial para que albergase las casas y huertas para dar cobijo y mantener a los enfermos. Tanta era la riqueza que se obtenía con los alquileres de casas, mulas y aportando comidas, que este pueblo se bautizó como Las Indias: ya no hacía

falta irse a América para hacer las indias. Las sanaciones iban en aumento, tanto que pronto se dijo que muchas de ellas eran milagrosas y fue entonces cuando el nombre de la Fuente Caliente se cambió por el de la Fuente Santa y a partir de entonces, aún quedando el topónimo, quedó también el nombre de la Fuente Santa como símbolo del carácter milagroso que le asignaban sus usuarios.

Cuando mayor era la riqueza que ya fluía a raudales por la isla, convirtiendo el puerto de Santa Cruz en el de mayor tráfico de barcos del archipiélago, cuando la santidad emanaba de todos los rincones y cuando la salud no era un problema para los palmeros, de golpe todo se acabó. El 13 de noviembre de 1677, un cuarto de hora puesto el sol, la tierra tembló y una enorme grieta nació al pie de la Montaña de Los Corrales desde donde se formaron 23 bocas que comenzaron a expulsar lava. Todos estos flujos se juntaron en uno solo que derivó hacia el oeste. Días más tarde se formó otro río incandescente que se dirigió hacia el sur cayendo por el acantilado situado al lado oriental de la fuente. Por último, el día 23 de noviembre otro gran río de lava llegó rápidamente hasta las escotaduras del acantilado cayendo en forma de varios torrentes que a la vez que desmoronaban el acantilado, vertían lavas, escorias, derrumbes y piroclastos que enterraron las charcas donde brotaba el milagroso manantial. Cuando en enero de 1678 acabó la erupción llamada de san Antonio, el paisaje era irreconocible. Arriba, en la Cuesta de Cansado, el pueblo de Los Canarios, la ermita de san Antonio y los campos de cultivo, yacían sepultados por toneladas de piedras; allí donde antes eran cultivos y viviendas, ahora estaban campos estériles de desolación convertidos en malpaíses. Abajo, en la playa, donde antaño los enfermos hacían turnos para bañarse en las charcas, ahora era una montaña de piedras sueltas, terriblemente disgregadas que habían provocado que el mar desapareciera enterrado y sus orillas se hubieran retirado 400 metros más adentro. La desolación de los enfermos y de los palmeros fue enorme. En un aciago día perdieron salud y riqueza, la isla nunca se recuperaría de esta brusca y terrible pérdida (Fig. 3)

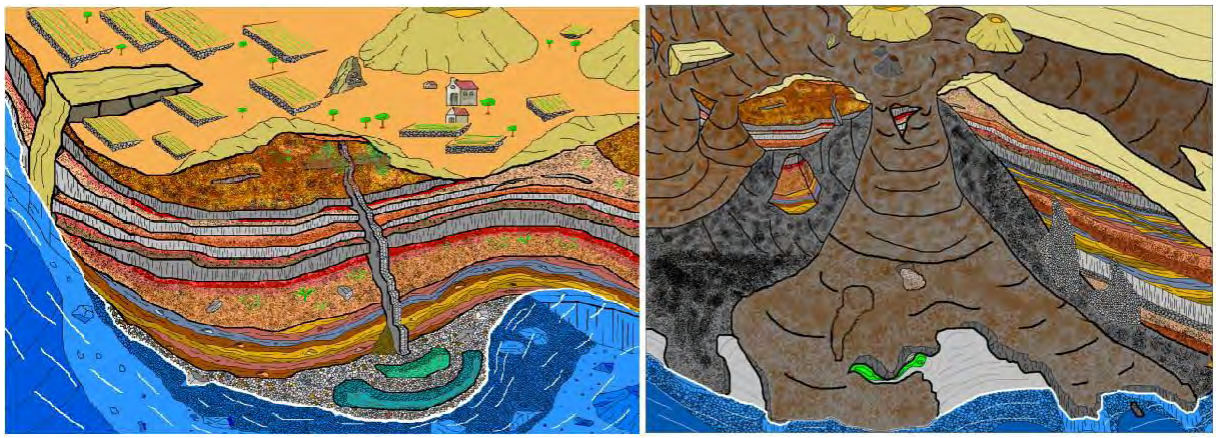


Figura 3 Vistas de cómo era el paraje antes y después de la erupción.

La primera autoridad insular que actuó fue la Santa Inquisición a través de su Oficial Mayor, don Juan Pinto de Guisla que se trasladó a la isla con objeto de emitir un informe debido a los problemas de orden público que se estaban produciendo. El informe concluyó en que era inútil intentar desenterrar la Fuente Santa porque quizás el poder calórico de la fuente se había perdido con la erupción. De esta forma las Autoridades Eclesiásticas, Civiles y Militares decidieron no intervenir en su recuperación, ni tan siquiera intentarlo por miedo al fracaso que se auguraba como cierto. Sin embargo la iniciativa privada, formada por enfermos sufragando los gastos y palmeros poniendo los trabajadores, tan solo diez años después, en 1687, decidieron perforar un pozo, justo en la vertical del emplazamiento de las charcas, determinado por las pocas señales que quedaban en los restos del acantilado sin romper o enterrar, Comienza así un largo periodo de más de tres siglos donde se sucederán

hasta dieciséis intentos para buscar la Fuente Santa. Todos se harán a base de perforar pozos y todos tendrán que luchar contra dos grandes inconvenientes: saber donde ubicar el pozo o lo que es lo mismo, averiguar donde yacen enterradas las charcas de san Lorenzo y de san Blas; y luchar contra la inestabilidad de las paredes del pozo, formadas por piedras del derrumbe, escorias y clastos de basalto con muy poca cohesión. Ninguno de estos intentos llegó al nivel del mar, ni tan siquiera lograron más de una decena de metros de pozo de los más de setenta que deberían haber perforado. En estos intentos colaboraron grandes e insignes personajes. Entre los que se conocen cabe citar a: Juan de Paz, Antonio Joseph Palmerini, Manuel Díaz Hernández, Beneficiado de la isla, Juan Antonio Pérez Pino, Leopold von Buch, Luciano Hernández Armas, Lucas Fernández Navarro, Juan Gabala y Enrique Godet, y Juan A. Kindelán, entre otros muchos menos conocidos.

También hubo muchos escritores que mediante su prosa o incuso su poesía, han mantenido viva la llama de la esperanza entre los palmeros. Entre ellos cabe citar a Robert Hooke, Alexander von Humboldt, José San Román y Rouger, y Dulce María Loaynaz.

En 1971 entró en erupción en el mismo lugar el volcán Teneguía. Sus aportaciones de lava fueron mucho menores que las de su antecesor pero a efectos de buscar la Fuente Santa, enterró lo que ya estaba enterrado y no hizo más que complicar las cosas, puesto que borró todos los intentos anteriores provocando la pérdida de referencias.

Entre los que la buscaron, tantos como generaciones se han sucedido en La Palma desde que se perdió hasta el día de hoy, y los que narraron el anhelo de una isla por desenterrar lo que el Averno un aciago día enterró, la fama de la las propiedades curativas de la Fuente Santa llegaron hasta nuestros días.

EL DESCUBRIMIENTO DE LA FUENTE SANTA.

La etapa de investigación. En 1995 el alcalde de Fuencaliente Pedro Nolasco Pérez Pérez encargó a la Dirección General de Aguas los trabajos para encontrar y descubrir el manantial. El Consejero de Obras Públicas Ildefonso Chacón, nombró para este trabajo al equipo de técnicos que suscriben esta ponencia. Se comenzaron las labores de investigación con una búsqueda exhaustiva de documentos en las iglesias, ayuntamientos, museos, sociedades e incluso se llegó hasta la Biblioteca Nacional, el Archivo Histórico Nacional de Madrid y la Royal Society de Londres. Fruto de esta investigación histórica se dedujo inicialmente que el manantial podía estar enterrado a lo largo de una zona que abarcaba 3 kilómetros de largo por cuatrocientos metros de ancho (fig 4). Dicha superficie se acotó más adelante a la tercera parte con nuevos datos históricos.

Figura 4. A) Zona donde podía estar enterrado el manantial. B) Situación de los sondeos.

En cualquier caso, con esta investigación se obtuvo que en todos los intentos anteriores el problema estaba siempre en colocar el pozo justo encima del emplazamiento de las charcas y la dificultad estribaba en que se desconocía el lugar. Cada uno de los intentos colocó el brocal del pozo de acuerdo a la libre y particular interpretación de unas frases que se transmitieron de padres a hijos durante tres siglos. Estas frases eran:

"El agua brotaba tan cerca del mar que en pleamar la mar la cubría".
"Manaba tan caliente que puestas unas lapas al punto se desconchaban".
"El agua salía de un material de tan blanda naturaleza que con una lanza fácilmente se hacían regatones".
"Brotaba al pie de un elevado risco de color plomizo".

A estas cuatro frases que cada uno interpretaba como podía, se unía el hecho de que se aseguraba que había una gran cruz de piedra que marcaba el lugar del emplazamiento. Una vez buscada la gran cruz hasta la saciedad, interpretadas de mil formas diferentes las cuatro frases, los que suscriben, optaron por aplicar un método científico y fue el de buscar la fuente perforando sondeos con recuperación de testigos y extracción de muestras de agua donde medir parámetros físico-químicos tales como temperatura, conductividades, carbonatos y bicarbonatos. Con esta idea se perforaron un total de cinco sondeos a rotación con extracción de testigo y de cuarenta metros cada uno, ubicados en la cuneta de la carretera. El reconocimiento geológico aportó poco puesto que el geólogo Luis Hernández tenía dificultades en diferenciar los materiales modernos de la Serie de la Dorsal con los materiales aportados por la erupción del san Antonio. Mucho más fiable fueron los datos aportados por el sondista Manuel Fernández que en un alarde de profesionalidad extrajo callaos en cada uno de los sondeos, con lo que se pudo marcar la profundidad del antiguo fondo de mar y por tanto la situación de la línea de playa antigua, aquella playa de callaos donde se deberían encontrar las dos charcas de san Lorenzo y san Blas. Los sondeos fueron encontrando temperaturas y contenidos en compuestos carbonatados cada vez mayores, hasta llegar al último sondeo que aportó 42º C y 28.000 mg/l de residuo seco.

Con esta etapa se obtuvo el dato hasta ahora incierto de que la fuente, tras la erupción del san Antonio e incluso después con la del Teneguía, seguía manando y con altas temperaturas. La diferencia estribaba en que antes los hacía sobre unas charcas mareales y ahora vertía sus caudales en un acuífero costero formado por materiales del derrumbe del acantilado, de las escorias y de las coladas de la erupción que la sepultó. Tras la obtención de estos datos el mismo equipo de ingenieros propuso a la Consejería de Obras Públicas redactar un proyecto de una galería, a diferencia de los anteriores intentos que habían sido de pozos, de 3,00 x 3,00 metros de sección y de 200 metros de longitud que con un presupuesto de medio millón de euros, fuera capaz de resistir los esfuerzos, mantener estable la sección, no permitir los derrumbes y maniobrar dentro del subsuelo para ir buscando el punto de surgencia del agua, mediante ese mismo método científico del gradiente térmico y de compuestos del carbono (Fig. 5) . Se aprobó el proyecto y se decidió ejecutar mediante dos fases. En esencia la obra consistía en una galería dirigida hacia el acantilado antiguo enterrado que parcialmente asomaba en aquellos lugares donde las erupciones del san Antonio y del Teneguía no lo había derruido o sepultado, para luego abrirse a derecha y a izquierda, colocando la galería al pié del acantilado, hasta interceptar la surgencia del agua de la Fuente Santa

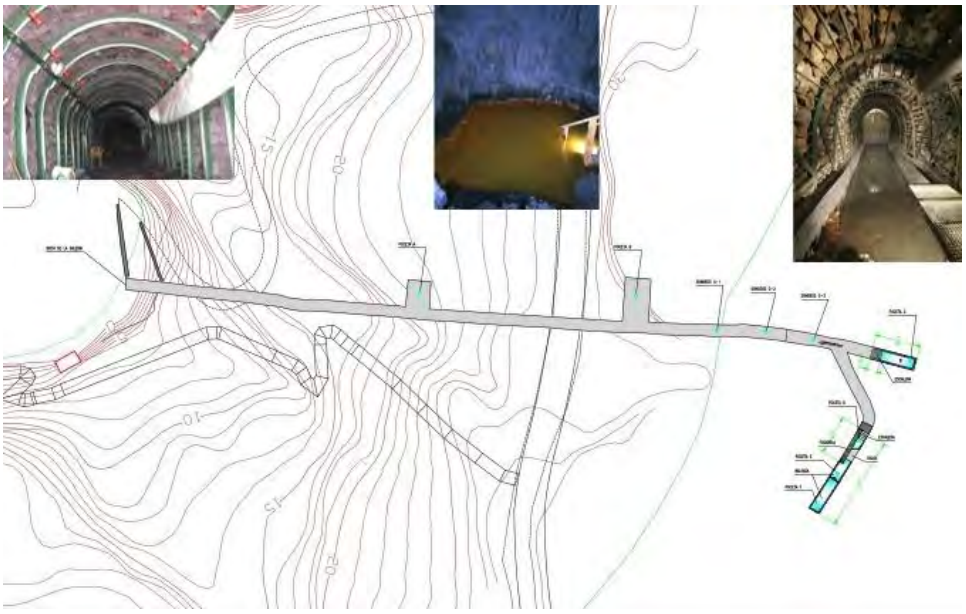


Figura 5. Planta de la galería

La etapa de perforación de la galería. En noviembre del año 2000 comienza la perforación de la primera fase de la Galería de Recuperación de la Fuente Santa, con un presupuesto parcial de 35 millones de pesetas -210.843,33 euros- y con ellos se hicieron 127 metros de galería. Se colocó la galería a ras de la pleamar viva equinoccial para así poder hacer pequeñas excavaciones en la solera y acceder al agua del acuífero donde medir temperaturas y parámetros químicos. Estos primeros metros fueron complicados de ejecutar debido a la falta de cohesión de los materiales que estaban formados casi en su totalidad por escorias volcánicas muy sueltas, de tamaño decimétrico, con pocas rugosidades que imbricándose nos dieran mayor estabilidad. Se optó, gracias a las labores del ingeniero de minas Herminio Torres por colocar cerchas de sujeción ancladas por redondos de obra y separadas por un metro de longitud y revestidas en el trasdós por las piedras extraídas en la excavación. A medida que se profundizaba la estabilidad era peor. Únicamente a los 50 y a los 100 metros se perforaron dos coladas de apenas seis o siete metros de ancho, cuya buena estabilidad permitió excavar dos grandes anchurones de 5,00 x 5, 00 metros de sección por diez metros de longitud. En estos anchurones se excavó tres metros por debajo del nivel mar, convirtiéndose en pocetas donde afloró el agua del acuífero y allí se pudieron determinar las variaciones de los parámetros químicos que se producían con la carrera de mareas. A lo largo de la traza de la galería se había ido observando que la temperatura del agua del acuífero, así como la ambiental de la galería y el contenido en dióxido de carbono, fue aumentando desde 28º C en el emboquille hasta 42º C en el anchurón de los 100 metros. En diciembre de 2001 se pararon las obras al agotarse el presupuesto de la primera fase. Se aprovechó la parada entre las dos fases para realizar tres sondeos inclinados desde la carretera y por delante de la proyección vertical del frente: a la derecha, delante y a la izquierda de la galería. Los resultados que dieron de temperatura fueron: 54º, 52º y 47º C respectivamente. Estos datos, las columnas geológicas ahora ya bien interpretadas por José Manuel Navarro Latorre, y los parámetros químicos obtenidos en la solera de la galería y en las dos pocetas, aseguraron que el agua de la Fuente Santa venía por el hastial derecho. De esta forma se ahorró la apertura del ramal de la izquierda y que supuestamente había que hacer cuando la galería llegara al acantilado antiguo.

En junio de 2004 comenzó la perforación de la segunda fase por el presupuesto que restaba hasta llegar al medio millón de euros. Nada más empezar, la sostenibilidad empeoró

aún más. Era debido a que el material cambió, ahora ya no eran las escorias y coladas que enterraron la fuente lo que se excavaba en la galería, ahora se había topado con los materiales de derrumbe que preceden a la caída de coladas por un gran acantilado de 150 metros de altura. El método usado hasta aquí y que consistía en clavar piquetes de dos metros por delante del techo de la galería y gunitar el frente, ya eran claramente insuficientes. Se optó por inyectar lechada de cemento por los tubos usados como piquetes y así, al fraguar la lechada alrededor de las piedras y los tubos, se construía una bóveda de hormigón armado que permitía excavar por debajo la galería con la que nos dirigíamos hacia el acantilado antiguo. Las inyecciones tenían que ser muy controladas ya que no podían meter cemento por debajo de la solera puesto que si lo hiciese entorpecería el camino del agua y confundiría el método del gradiente térmico.

El acantilado antiguo apareció a los 167 metros de galería, cuarenta metros más atrás de lo previsto, lo cual quería decir que era más vertical y por tanto más estable de lo también previsto. Se retrocedieron diez metros y en el hastial derecho se comenzó la perforación a 45º del ramal. A los diez metros en esa dirección se chocó de nuevo con el acantilado antiguo y se giró otros 45º con los que, tras estos dos cambios de dirección, el ramal se había colocado ortogonal a la galería principal y al pie del acantilado antiguo. En esta situación y tras perforar diez metros y llevando temperaturas del agua del acuífero por debajo de la solera de 45º C, las más altas muestreadas por debajo de la solera, la galería que tenía el hastial izquierdo en el acantilado antiguo, chocó contra un enorme dique que sobresalía del acantilado inundando toda la sección de la galería. A la vista de este dique se comprendieron las cuatro frases ancestrales y todas señalaban al pie del dique como el lugar donde salían las aguas de la Fuente Santa. Es más, el dique volcánico de un espesor de seis metros sobresalía cual mascarón de proa del acantilado. Este hecho llamó la atención de los que suscriben y saliendo fuera de la galería buscaron el dique en las estribaciones del acantilado, en la misma vertical de la galería. Y allí lo encontraron, atravesando una capa de piroclastos marrones que al contener una colada horizontal en su mitad, dibujaba una gran cruz de piedra, de unos treinta metros de envergadura, que presidía el acantilado (Fig. 6).

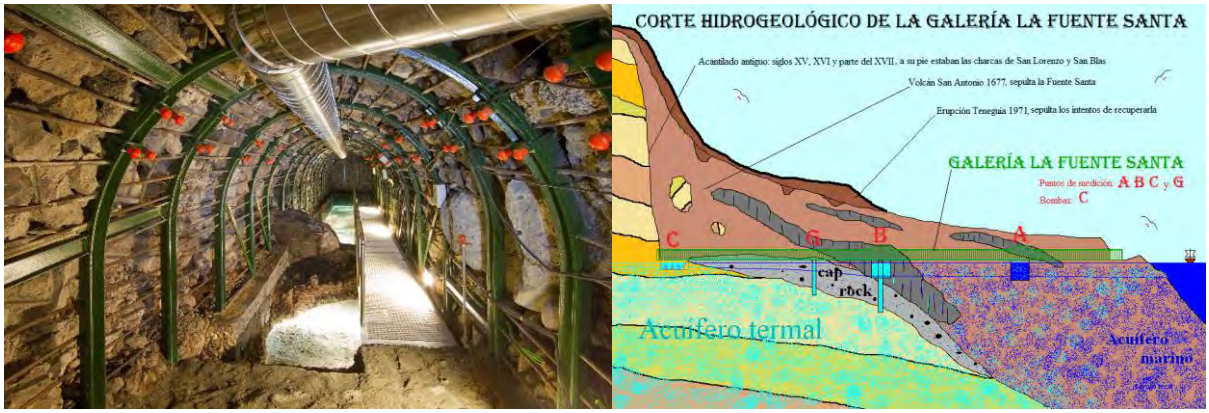


Figura 6. A) Poceta D y E en medio el dique volcánico. B) Perfil hidrogeológico de la galería.

Una vez encontrada la Fuente Santa por la correcta interpretación de las frases y la cruz, quedaba demostrado el hallazgo por el método científico del gradiente usado para llegar hasta el pie del dique. Por esa razón, se perforó el dique y nada más pasar del otro lado, a los diez metros, la temperatura disminuyó de 45º a 30º C, con lo que confirmaba que el punto de mayor temperatura era el pie occidental del dique volcánico y era allí donde se localizaba la surgencia del agua de la Fuente Santa.

Puesto que el agua de la fuente surge del acantilado antiguo y vierte ahora en un acuífero costero formado por los materiales derrumbados de la erupción del san Antonio, que

presentan una elevada permeabilidad, se hizo un ensayo de bombeo de larga duración para evaluar el caudal que se podía extraer sin generar afecciones al acuífero. El ensayo consistió en arrancar paulatinamente tres bombas de 0,7 l/s, colocadas en la poceta C. Entre el arranque de una y el arranque de la siguiente mediaron siempre 24 horas y tras la última y con las tres extrayendo, se dejaron dos días funcionando. A lo largo de todo el ensayo se determinaron, con periodicidad de tomas cada diez minutos, la conductividad, la temperatura y el nivel de agua. La interpretación del ensayo de bombeo en este acuífero costero fue que la extracción continuada de 2 l/s generaba un descenso de los niveles, sobre todo y más acentuado el correspondiente a la bajamar en el acuífero, pero a su vez se observaba que este descenso llevaba aparejado un aumento de la temperatura y un descenso de la conductividad. El resultado final fue que la extracción de ese caudal, más que suficiente para la instalación de un balneario, desde la poceta C no afectaba a las demás pocetas y no generaba intrusión marina (Fig. 7).

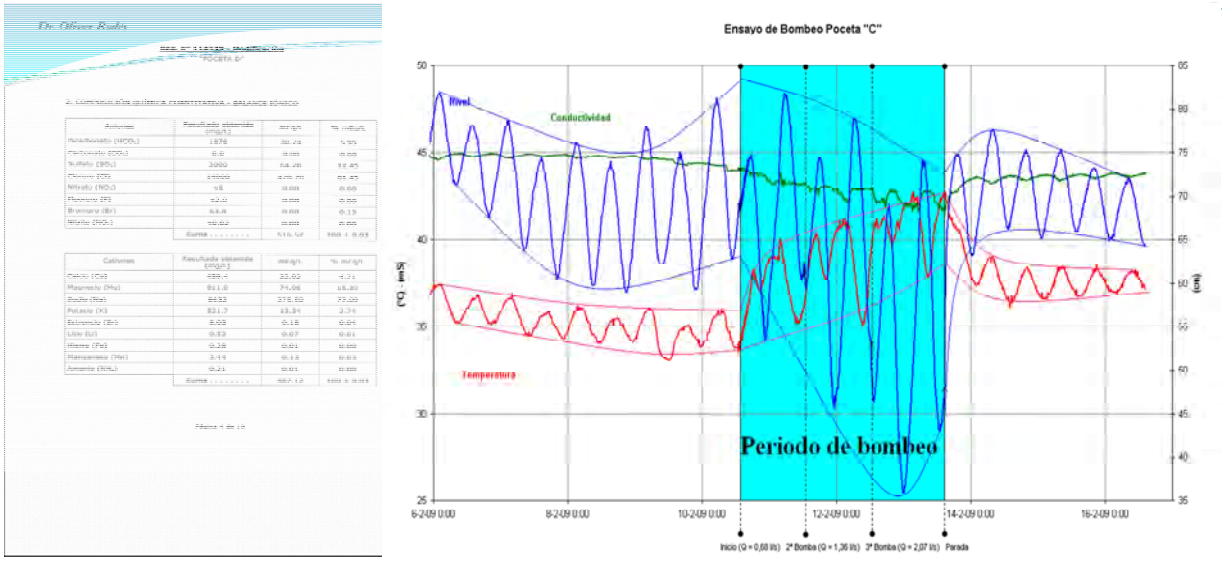


Figura 7. Análisis de agua de la poceta D y gráfico de niveles, conductividad y temperatura.

CONCLUSIÓN

Desenterrar la Fuente Santa ha sido el mayor anhelo que ha tenido la isla de La Palma. Este deseo obsesionó a todas las generaciones durante tres largos siglos y para intentar mitigarlo intervinieron grandes científicos europeos que no lograron más que arañar la caótica superficie del malpaís que la ocultaba.

Tras una inicial etapa de adquisición de datos históricos y geológicos, los ingenieros que suscriben propusieron una obra realmente singular a la Consejería de Obras Públicas que fuera capaz no solo de resistir los derrumbes sino además también de poder maniobrar en el subsuelo para así poder buscar y encontrar la Fuente Santa mediante métodos hidrogeológicos e hidroquímicos. Al final y gracias al uso de cuatro ciencias: la Historia, la Geología, la Ingeniería y la Química del agua se logró encontrar el mítico naciente.

Una vez analizadas las aguas se comprendió el anhelo por recobrarla: las aguas eran cloruradas carbogaseosas, únicas en España y las terceras encontradas en Europa. Por su contenido en sales, temperatura y dióxido de carbono están catalogadas como las mejores de Europa por la Real Academia de Medicina de Zaragoza.

ISBN: 978-84-938046-4-0

CONTRIBUCIÓN DE LOS ESTUDIOS ELECTROMAGNÉTICOS AEROPORTADOS (HTEM) A LA CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE ISLAS VOLCÁNICAS: REVISIÓN DE LAS ÚLTIMAS INVESTIGACIONES

Benoit VITTECOQ[1]

[1] BRGM – Basse-Normandíe, 4 avenue de Cambridge, 14200 Hérouville-Saint-Clair, Francia, b.vittecoq@brgm.fr

RESUMEN

El desarrollo demográfico y económico de numerosas islas volcánicas, y las necesidades de agua asociadas, requieren llevar a cabo una gestión adaptada de sus recursos de agua. Sin embargo, el conocimiento geológico e hidrogeológico como requisito previo es a menudo limitado, y las prospecciones sobre el terreno deben hacer frente a dificultades de acceso y a la heterogeneidad de los depósitos volcánicos (variaciones laterales y verticales, meteorizaciones…). La utilización de métodos geofísicos aeroportados mediante helicópteros permite superar las dificultades de acceso, pendientes y vegetación, y permite cubrir de forma homogénea un territorio. El sistema de medidas electromagnéticas en el dominio de tiempos con helicópteros SkyTEM ha sido utilizado en los últimos años en varias islas volcánicas con el fin de cartografiar en tres dimensiones las variaciones de resistividad de los 200-300 primeros metros de profundidad. Los resultados obtenidos permiten mejorar el conocimiento del funcionamiento hidrogeológico de estas islas volcánicas. Una compilación de las principales correlaciones entre resistividades y litología ha permitido disponer de un primer encuadre para realizar una interpretación detallada. De este modo, se han puesto en evidencia varias estructuras geológicas clave que afectan el flujo de las aguas subterráneas. Por otro lado, la débil resistividad del agua de mar permite mejorar significativamente la cartografía de las intrusiones salinas y la estructuración de los sistemas acuíferos asociados.

Palabras clave: *TDEM, HTEM, Resistividad, acuífero volcánico, hidrogeología de isla volcánica*

ABSTRACT

The demographic and economic development of many volcanic islands and associated water needs, require appropriate management of their water resources. The geological and hydrogeological knowledge is nevertheless often limited and field surveys are constrained by access difficulties and heterogeneity of volcanic deposits (lateral and vertical variations, alterations ...). Using heliborne geophysical methods overcomes access constraints, steep slopes and dense vegetation, and can cover homogeneously a whole area. The helicopter-borne electromagnetic measurements in time domain SkyTEM system has been used in recent years on several volcanic islands to map three-dimensional resistivity variations of the first 200-300 meters deep. The main results obtained with this system improve our understanding of the hydrogeological functioning of volcanic islands and associated geological structures. A compilation of main correlations between resistivity and lithology in

literature also provide a first guideline enabling a detailed interpretation. Thus, several key geological structures conditioning flows have been highlighted (perched aquifers, paleo-valleys, volcano-sedimentary deposits ...). Finally the very low resistivity of seawater significantly improves the mapping of seawater intrusion and associated aquifer systems.

Key words: *TDEM, HTEM, Resistivity, volcanic aquifer, island hydrogeology*

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso estratégico de las islas habitadas, especialmente en aquellas que han sufrido un aumento significante de la población en las últimas décadas. Una gestión razonada de este recurso es indispensable para garantizar el suministro de agua potable a la población y para ello se hace necesario estudiar la zona mediante el uso de herramientas adaptadas a cada área. Una de las primeras etapas de este estudio es la caracterización hidrogeológica de estas islas con el fin de proponer modelos conceptuales de funcionamiento y una cartografía de los acuíferos y acuitardos fiables. En las islas volcánicas, y sobre todo en las islas tropicales, los reconocimientos geológicos e hidrogeológicos son a menudo difíciles debido a la limitación de accesos a los lugares de estudio (pendientes importantes, vegetación abundante, pocas pistas de acceso, condiciones climáticas muy húmedas) y a la complejidad de los depósitos volcánicos (variaciones litológicas horizontales y verticales, a menudo tapadas por la meteorización). Además, muchas veces hay pocos pozos disponibles para una caracterización hidrogeológica detallada, lo que limita la validación de los diferentes enfoques y métodos. La utilización de métodos geofísicos con helicópteros permite hacer frente a estos inconvenientes, y permite cubrir de una forma homogénea un territorio en un tiempo reducido (entre unos días y unas semanas), por ejemplo, un mes en Mayotte para un lineal de 3.000 km. El sistema electromagnético en dominio del tiempo (TDEM o HTEM) SkyTEM (Sørensen y Auken, 2004) ha sido utilizado en los últimos tiempos en varias islas volcánicas con el fin de cartografiar las variaciones de resistividad entre los 200 y 300 primeros metros de profundidad. Este sistema fue utilizado por primera vez en un contexto volcánico en 2006 por las universidades UPMC (Université Pierre et Marie Curie) - Sorbonne y Aarhus en el archipiélago de Galápagos (Figura 1) sobre las islas de Santa Cruz y San Cristóbal (d'Ozouville, 2007; d'Ozouville et al., 2008; Auken et al., 2009 ; Pryet, 2011 ; Pryet et al., 2011 y 2012). Este sistema ha sido utilizado en la isla de Mayotte (territorio Francés de ultramar), Grande Terre y Petite Terre, en 2009 por el BRGM (Bureau de Recherche Géologique et Minière) y la Universidad de Aarhus (Schamper et al., 2013; Vittecoq et al., 2011, 2014), y después por el BRGM en Martinica y Guadalupe (Pequeñas Antillas) en 2013 y sobre la isla de la Reunión (territorio Francés de ultramar) en 2014.

Esta presentación tiene como objetivo, tras una breve descripción del método, sintetizar los principales resultados obtenidos usando este sistema, permitiendo así mejorar la comprensión del funcionamiento hidrogeológico de las islas volcánicas.

METODOLOGÍA

En los últimos años se han desarrollado diversos sistemas de adquisición de datos electromagnéticos con helicóptero (HTEM) como se indica en las síntesis realizadas por Robinson et al. (2008) y Siemon et al. (2009). El método SkyTEM es un sistema electromagnético con dominio del tiempo (TDEM) que permite medir las variaciones de resistividad del suelo en los 200-300 primeros metros. SkyTEM utiliza dos momentos magnéticos, un momento débil que permite tener una buena resolución en la superficie, y un momento fuerte que permite tener una buena resolución en profundidad (Sørensen y Auken,

2004). Los datos obtenidos son filtrados para evitar ruidos naturales y de origen humano e invertidos usando dos modelos principales de inversión. El primero modelo de inversión utiliza varias capas, generalmente entre 4 y 7, calculando la resistividad y el espesor asociado a cada capa. El segundo es un modelo multicapa (generalmente entre 20 y 25 capas). En este caso el espesor de las capas es fijo y solo se calcula la resistividad. La interpolación de los datos de resistividades de los sondeos se realiza con métodos de tipo krigeado, para cada tipo de inversión, permitiendo obtener un modelo de resistividad en 3D. Este modelo puede ser exportado en formato VTK para su visualización con la ayuda del programa ParaView (Henderson, 2007). La resistividad del subsuelo puede ser representada en una, dos o tres dimensiones.

Figura 1. Archipiélago de Galápagos (Santa Cruz y San Cristóbal) : 1. Mayotte (Grande Terre et Petite Terre): 2. Martinica: 3. Guadalupe: 4. Isla de la Reunión: 5.

La tabla 1 recoge las principales características de los trabajos realizados usando SkyTEM método en estos últimos años.

RESULTADOS

Relación entre resistividad y litología

La interpretación de los datos de resistividad, conocer las correlaciones entre las resistividades obtenidas y la litología, se ha realizado mediante dos enfoques distintos en los diferentes enclaves estudiados, condicionados por los datos existentes.

En el archipiélago de Galápagos (d'Ozouville et al., 2008; Auken et al., 2009; Pryet et al., 2011 y 2012), donde se disponía de un único pozo, los datos de las resistividades se compararon con los valores disponibles en la documentación, obtenidos en otras islas volcánicas (La Reunión, Cabo Verde, Maui) con métodos electromagnéticos de «suelo», y con las observaciones geológicas realizadas sobre el terreno y documentación geológica disponible. En la isla de Mayotte (Vittecoq et al., 2014), las correlaciones entre los valores de resistividades y litología se realizaron con datos geológicos hidrogeológicos de 52 pozos. Estas correlaciones mostraron que las correlaciones entre las resistividades y la litología no son unívocas. Así, en las islas de Galápagos, las resistividades comprendidas entre 10 y 200 ohm•m pueden corresponder a la vez a coluviones, a formaciones superficiales alteradas o a horizontes saturados y acuíferos. De la misma manera, en la isla de Mayotte, las relaciones entre resistividades y naturaleza de las formaciones acuíferas o acuitardos tampoco son unívocas; los horizontes con resistividades comprendidas entre 7 y 100 Ω•m

pueden corresponder tanto a formaciones acuíferas como a alteritas.

Tabla 1. Principales características de los trabajos realizados usando SkyTEM método en estos últimos años (trabajos publicados con referencia).

Referencia	Isla	Superficie	Fecha estudio	Dura-ción	Zona de investigación	Líneas de vuelo	Espaciado entre las líneas de vuelo
Ozouville et al., 2008 ; Auken et al., 2009 ; Pryet et al., 2011	Santa Cruz, Galápagos	990 km²	Mayo 2006	8 días	190 km²	900 km	200 m
Pryet et al., 2012	San Cristóbal, Galápagos	560 km²	Mayo 2006	4 días	pendientes barlovento (al sur de la isla) y algunas líneas a través de la isla	900 km	200 m
Schamper et al., 2013 ; Vittecoq et al., 2014	Mayotte	380 km²	Octubre 2010 - Noviembre 2010	1 mes	toda la isla	3000 km	200 m estrechamiento de 50 a 100 m en noreste y en la isla de Petite Terre

Sin embargo, aunque las relaciones entre las resistividades y la litología no son unívocas, pueden observarse fuertes tendencias que permiten servir de guía para una interpretación más detallada. La Figura 2 muestra los rangos de resistividades y formaciones asociadas descritas en la documentación (d'Ozouville et al., 2008; Auken et al., 2009; Pryet et al., 2012; Nehlig et al., 2013; Schamper et al., 2013; Vittecoq et al., 2014).

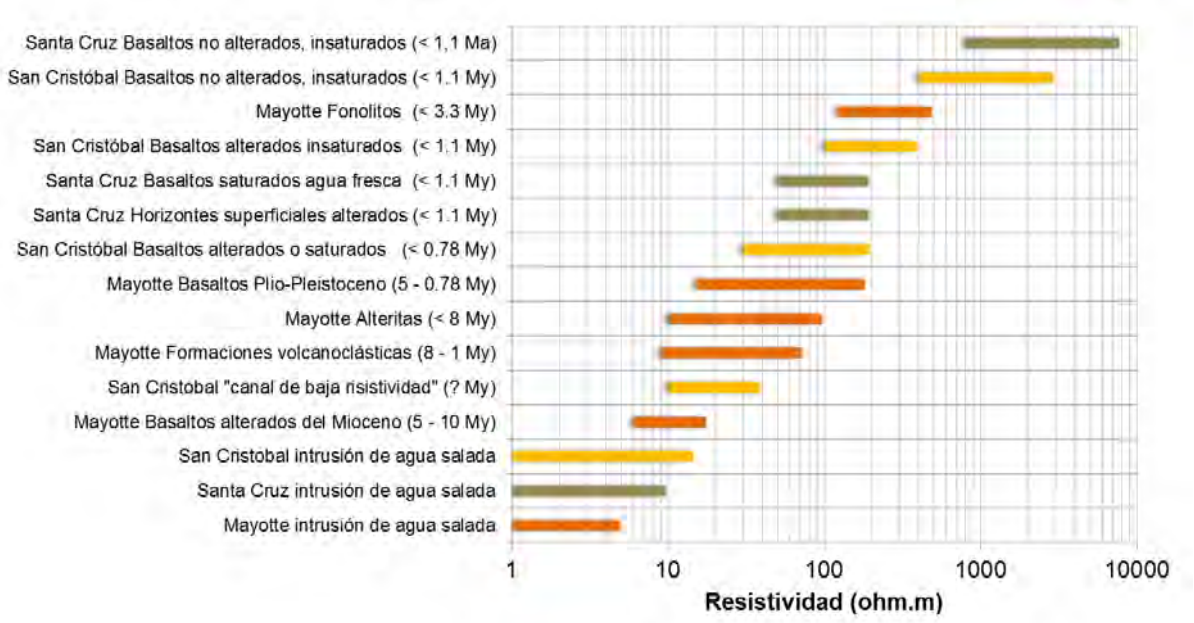


Figura 1. Relación entre la resistividad obtenida mediante SkyTEM, la litología de las diferentes zonas estudiadas y la edad de las unidades litológicas

Las formaciones que presentan resistividades elevadas (>200 ohm•m) corresponden a basaltos no alterados o a fonolitas. Desde un punto de vista hidrogeológico, estas fuertes resistividades deben asociarse a horizontes no saturados. Las resistividades más débiles (1 – 15 ohm•m) se asocian a intrusiones salinas, la fuerte conductividad del agua de mar (20-

50 mS/cm) induce una resistividad equivalente del orden de 0.2-0.5 ohm•m (el diferencial entre 0.2 y 15 ohm•m depende de la porosidad y de la proporción de arcilla de la formación). Para las resistividades intermedias comprendidas entre 10 y 200 ohm•m las correlaciones directas son más delicadas y es necesario estudiar la geomorfología, la estructura y la profundidad de los horizontes considerados. La Figura 2 también muestra una relación entre la edad de las formaciones y los valores de resistividades, como fue comprobado en la isla de Mayotte (Vittecoq et al., 2014) donde cuanto más antiguas son las formaciones, más débiles eran las resistividades. Esta correlación parece confirmarse en las dos islas de las Galápagos, islas bastante más jóvenes que Mayotte. Así, las formaciones más recientes presentan las resistividades más importantes, y serán tanto más importantes en la zona no saturada.

Estructuras geológicas

La representación de los valores de resistividad en una figura 3D, una vez unificadas las capas y realizados algunos filtros de umbrales de resistividades, de profundidad,…, muestra las diferentes formaciones y estructuras geológicas e hidrogeológicas como complemento de las correlaciones resistividad-litología.

Se muestra como ejemplo dos cortes realizados en la isla Grande Terre de Mayotte (Figura 3) donde se distinguen coluviones de entre unos metros y la decena de espesor sobre los lados de los diferentes edificios. Las alteritas, que cubren el 70% de la superficie de la isla, se distinguen de las formaciones subyacentes. También se muestran varias estructuras geológicas que contribuyen a contener derrames subterráneos: capas elevadas, paleovalles, etc.

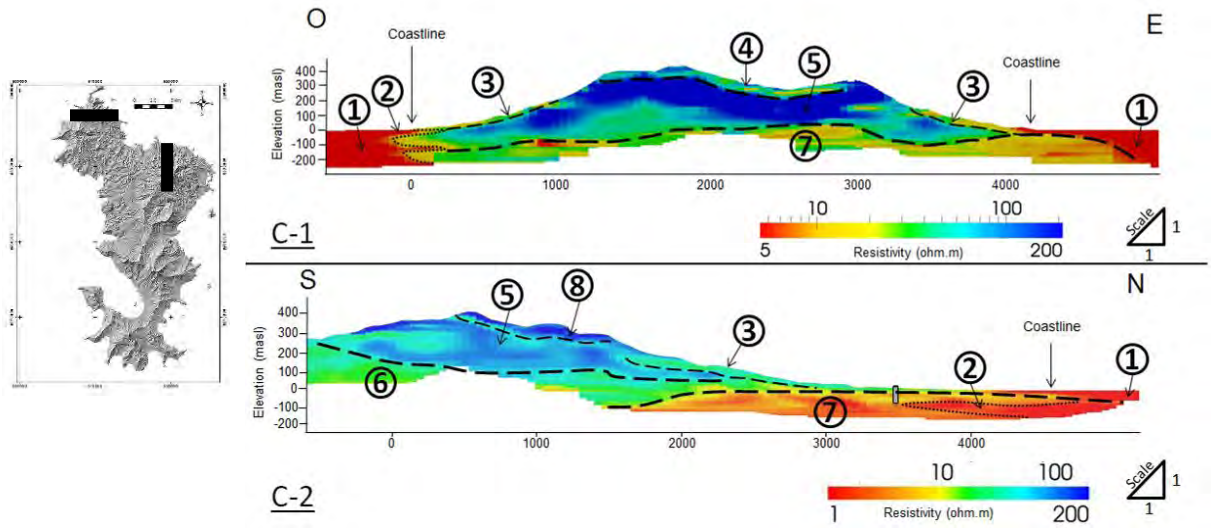


Figura 2. Ejemplos de dos cortes realizados en Mayotte (modificado de Vittecoq et al, 2014) (1): agua marina – (2): intrusiones salinas – (3): Coluviones y alteritas – (4): Alteritas – (5): Basaltos Plio-Pleistoceno poco alterados – (6): formaciones volcanosedimentarias – (7): Basaltos Mioceno alterados – (8): vertido de fonolita.

En la isla Grande Terre de Mayotte (Figura 3), se puso en evidencia la estructuración de la isla con una alternancia entre fases de edificación, con la puesta en marcha de lavas basálticas, de macizos de fonolitas y de depósitos piroclásticos, y fases de desmantelamiento con el depósito a lo largo de las pendientes y en las depresiones topográficas de materiales volcanoclásticos. Se definió también un nuevo modelo hidrogeológico conceptual adaptado a la historia polifásica de esta isla y se propuso una primera cartografía de los acuíferos (Vittecoq et al., 2014). Este mapa se pudo validar por

una reciente campaña de 8 nuevos pozos. A menor escala, las estructuras de tipo "paleovalles" desempeñan también un papel importante a la hora de canalizar los vertidos subterráneos. Se pusieron en evidencia varios tipos de paleovalles, en función de la naturaleza de las formaciones de llenado y de la naturaleza del substrato (Pryet et al., 2012; Vittecoq et al., 2011 y 2014). Estas estructuras son también objetivos privilegiados para la realización de perforaciones de reconocimiento.

A modo de ejemplo se muestran otros resultados obtenidos usando esta metodología donde se ha observado que la isla de Santa Cruz está marcada, en su flanco sur, por la presencia de un horizonte conductor interpretado como una capa elevada, siendo las resistividades de este horizonte compatibles con basaltos saturados (d'Ozouville et al., 2008 y Auken et al., 2009). Otros horizontes conductores asimilables a capas elevadas poco gruesas se observan igualmente en San Cristóbal (Pryet et al., 2012) y se correlacionan con fuentes observadas en altitud.

Intrusión de agua salada

Las intrusiones marinas pueden tener un impacto significativo en el suministro de agua de las islas volcánicas. Su cartografía es fundamental para una gestión adecuada del agua y de los pozos situados cerca del litoral o que exploten acuíferos cuyo nivel estático está cerca o por debajo del nivel del mar. En las diferentes islas estudiadas, el método SkyTEM ha demostrado ser particularmente eficaz, debido al contraste de resistividad que provoca la alta conductividad del agua salada.

Las islas volcánicas de tipo hawaiano (Santa Cruz, San Cristóbal), con niveles a poca altitud y una fuerte permeabilidad, muestran intrusiones marinas que pueden alcanzar varios kilómetros hacia el interior de la isla. La cartografía de estas intrusiones permite determinar la profundidad de la interfaz agua dulce/agua salada (Auken et al., 2009; Pryet et al., 2012).

En la isla Petite Terre de Mayotte (Figura 4), los resultados muestran que la intrusión de agua marina penetra en el interior de las tierras (Figura 4A y 4B). Esto podría deberse a que la isla está constituida principalmente por depósitos piroclásticos muy porosos y la pluviometría es relativamente escasa. En esta isla, la explotación de las aguas subterráneas no es posible, ya que una perforación de reconocimiento realizada en el centro de la isla a 40 m de profundidad presenta una conductividad de agua demasiado elevada (2000 µS/cm).

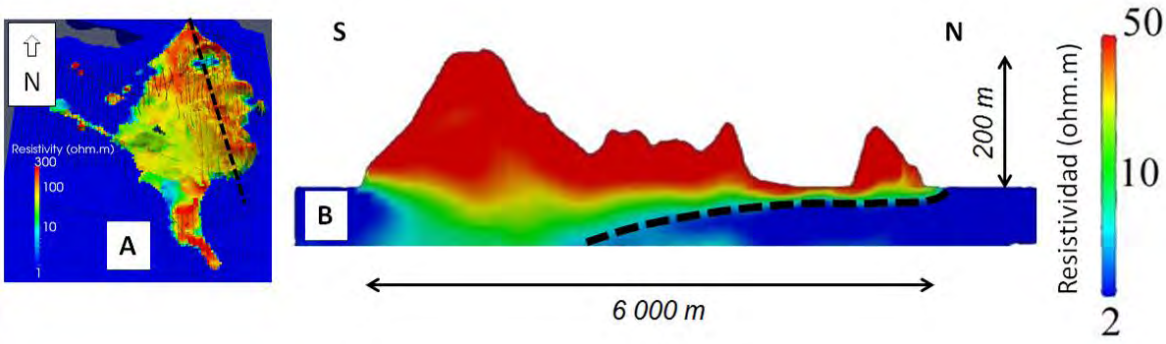


Figura 3. A : Mapa de la resistividad de las formaciones superficiales de la isla de Petite-Terre (Mayotte) – B : Corte S-N de la isla de Petite-Terre, con una escala de color que permite poner en evidencia el contraste de resistividad entre las piroclastitas no saturadas (rojo), las piroclastitas saturadas con agua dulce (verde) y el agua de mar y piroclastitas saturadas de agua salada (azul).

En la isla de Grande Terre de Mayotte las formaciones geológicas que la forman son más antiguas (1-10 Ma) y menos permeables, por lo que la intrusión marina no penetra tanto. En

las áreas donde los basaltos Miocenos (5-10 Ma) alterados están en contacto con el agua de mar, normalmente no hay intrusión marina, ya que los basaltos son poco permeables o impermeables (cf. corte C1 de la Figura 3, en el este). Sin embargo, donde los acuíferos está constituidos constituida por basaltos más recientes (1-5 Ma) y más permeables (cf. corte C1 de la Figura 3, en el oeste), la interfaz agua dulce/agua salada es claramente identificable. Por otro lado, en estas zonas los fuertes gradientes piezométricos calculados (2-4%), asociados a una recarga significativa (200 mm/año) permiten mantener un equilibrio limitando las intrusiones salinas a unas centenas de metros en el interior de las tierras.

DISCUSION Y CONCLUSION

El método SkyTEM permite mejorar el conocimiento del funcionamiento hidrogeológico de las islas volcánicas donde otros métodos no son viables debido a la falta de pozos y las dificultades de acceso al terreno.

Este método presenta algunas limitaciones. A lo largo de las líneas de vuelo, el dispositivo permite la obtención de un sondeo cada 20-30 m, la distancia entre las líneas de vuelo (de 100 a 400 m) conlleva por lo tanto una anisotropía de la información. Si están demasiado espaciadas, algunas estructuras de dimensión inferior al espaciamiento no se captarán. Para evitar este problema, las líneas de vuelo deberían dibujarse perpendicularmente a las estructuras supuestas o a los ejes de los paleovalles, vertidos, túneles…. Por otro lado, la profundidad de la investigación no es homogénea y depende de la resistividad y del espesor de las formaciones. Por ejemplo, las zonas conductoras generan una señal fuerte pero la atenuación de las ondas EM es fuerte, lo que limita la profundidad de investigación. Al contrario, las zonas resistentes generan una señal débil, que tiene como consecuencia una sensibilidad menor, pero las ondas EM son muy poco atenuadas. La profundidad de investigación será más importante si existe un contraste de resistividad. Finalmente, como en cualquier otro método electromagnético, la presencia de líneas eléctricas y de infraestructuras metálicas no permite la obtención de datos. Por lo tanto, el sobrevuelo de ciudades y pueblos no es viable y además a menudo está prohibido por las autoridades locales.

A pesar de estas algunas restricciones, este método se ha demostrado eficaz en un primer acercamiento, especialmente en las islas de las que no se disponen de datos geológicos e hidrogeológicos. El método pone en evidencia las principales estructuras y permite contemplar las prospecciones más adecuadas. Como en todos los métodos geofísicos, los resultados deben ser comparados con las observaciones realizadas en el campo y la se deben realizar actualizaciones regulares de las bases de datos de correlaciones entre litología y resistividad para mejorar las interpretaciones futuras.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea dar las gracias a Dr. J. Deparis y Dra. S. Violette por su revisión del primer documento y también a un revisor anónimo para la versión final.

REFERENCIAS

Auken, E. & Christiansen, A. V. (2004). *Layered and laterally constrained 2D inversion of resistivity data*. Geophysics, 69, 752-761.

Auken, E.; Violette, S.; d'Ozouville, N.; Deffontaines, B.; Sorensen, K.I.; Viezzoli, A. y de Marsily. G.

(2009). *An integrated study of the hydrogeology of volcanic islands using helicopter borne transient electromagnetic: application in the Galapagos Archipelago.* C.R. Geosciences 341, 899-907.

Henderson, A. (2007). *ParaView Guide, A Parallel Visualization Application*. Kitware Inc.

d'Ozouville, N. (2007). *Etude du fonctionnement hydrologique dans les îles Galapagos: caractérisation d'un milieu volcanique insulaire et préalable à la gestion de la ressource*. PhD-Thesis Université Paris 6 Pierre et Marie Curie, France.

d'Ozouville, N.; Auken, E.; Sorensen, K.I.; Violette, S. y de Marsily, G. (2008). *Extensive perched aquifer and structural implications revealed by 3D resistivity mapping in a Galapagos volcano.* Earth and Planetary Sc. Letters, 269, 517-521.

Nehlig, P.; Lacquement, F.; Bernard, J.; Caroff, M.; Deparis, J.; Jaouen, T.; Pelleter, A.; Perrin, J.; Prognon, C. y Vittecoq, B. (2013). *Notice de la carte géologique de Mayotte* BRGM/RP-61803-FR.

Pryet, A. (2011). *Hydrogeology of volcanic islands: a case-study in the Galapagos Archipelago (Ecuador).* PhD-Thesis Université Paris 6 Pierre et Marie Curie, France.

Pryet, A.; Ramm, J.; Chiles, J.-P.; Auken, E.; Deffontaines, B. y Violette, S. (2011). *3-D resistivity gridding of large AEM datasets: A step toward enhanced geological interpretation.* J. Appl. Geophys., 75, 277–283.

Pryet, A.; d'Ozouville, N.; Violette, S.; Deffontaines, B. y Auken, E. (2012). *Hydrogeological settings of a volcanic island (San Cristóbal, Galapagos) from joint interpretation of airborne electromagnetics and geomorphological observations,* Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 9, 9661-9686.

Robinson D.A.; A. Binley A.; Crook N.; Day-Lewis F.D.; Ferre T.P.A.; Grauch V.J.S.; Knight R.; Knoll M.; Lakshmi V.; Miller R.; Nyquist J.; Pellerin L.; Singha K. y Slater L. (2008) *Advancing process-based watershed hydrological research using near-surface geophysics: a vision for, and review of, electrical and magnetic geophysical methods.* Hydrological Processes, 2008. 22(18): p. 3604-3635.

Schamper, C.; Pedersen, J.B.; Auken, E.; Christiansen, A.V.; Vittecoq, B.; Deparis, J.; Jaouen, T.; Lacquement, F.; Nehlig, P.; Perrin, J. y Reninger, P.A. (2013). *Airborne Transient EM Methods and Their Applications for Coastal Groundwater Investigations.* In Groundwater in the Coastal Zones of Asia-Pacific, C. Wetzelhuetter (ed.), Coastal Research Library 7, DOI 10.1007/978-94-007-5648-9_7.

Siemon B.; Christiansen AV. y Auken E. (2009) *A review of helicopter-borne electromagnetic methods for groundwater exploration.* Near Surf Geophys 7(5–6):629–646

Sørensen, K.I. & Auken, E. (2004). SkyTEM - *A new high-resolution helicopter transient electromagnetic system.* Explor. Geophys., 35, 191–199.

Vittecoq, B.; Deparis, J.; Auken, E.; Nehlig, P.; Perrin, J.; Puvilland, P. y Martelet, G. (2011). Buried valleys revealed *by helicopter borne transient electromagnetic and hydrogeological implications: example of the volcanic island of Mayotte.* 2011 GSA Annual Meeting, Minneapolis.

Vittecoq, B.; Deparis, J.; Violette, S.; Jaouen, T. y Lacquement, F. (2014). *Influence of successive phases of volcanic construction and erosion on Mayotte Island's hydrogeological functioning as determined from a helicopter-borne resistivity survey correlated with boreholegeological and permeability data*. Journal of Hydrology, Volume 509, 2014, Pages 519–538 http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.062

ISBN: 978-84-938046-4-0

VALIDACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DE LA ISLA DE MAYOTTE MEDIANTE LA PERFORACION DE OCHO POZOS

Benoit VITTECOQ[1], Jacques DEPARIS[2], Sophie VIOLETTE[3], Timothée JAOUËN[4], Frederic LACQUEMENT[2], Remy COULOMB[4], Manuel PARIZOT[4].

[1] BRGM – Basse-Normandie, 4 avenue de Cambridge, 14200 Hérouville-Saint-Clair, Francia, b.vittecoq@brgm.fr
[2] BRGM – 3 avenue Claude Guillemin, 45060 Orléans, Francia, j.deparis@brgm.fr; f.lacquement@brgm.fr
[3] Universidades UPMC-Sorbona / ENS & CNRS, UMR 8538 – Laboratorio de Geología, 24 rue Lhomond, 75231 París, Francia, sophie.violette@upmc.fr
[4] BRGM – Mayotte, 9 centre amatoula, ZI de Kawéni, 97600 Mamoudzou, Mayotte,; m.parizot@brgm.fr ; T.Jaouen@burgeap.fr

RESUMEN

La isla de Mayotte es un pequeño territorio francés (374 km²) del archipiélago de las Comoras, en el océano Índico. En octubre de 2010, se realizó un estudio geofísico mediante helicóptero (SkyTEM) por toda la isla para caracterizar las variaciones de resistividad en profundidades de hasta 250 m, y mejorar la comprensión del funcionamiento hidrogeológico de la isla. Las correlaciones cruzadas entre los valores de resistividad y los datos geológicos e hidrogeológicos de 52 pozos permiten demostrar que cuanto más antigua es la formación, menor es su resistividad y su transmisividad. La interpretación del modelo de resistividad 3D permite una caracterización hidrogeológica detallada de la isla y la delimitación de la extensión de los distintos acuíferos. Sobre la base de esas interpretaciones, se perforaron ocho nuevos pozos de una profundidad de entre 80 y 127 m. Siete pozos se perforaron con éxito, con un rendimiento operativo de entre 10 y 60 m^3/h, transmisividades de entre 2,0 x 10^{-4} y 1,8 x 10^{-2} m^2/s, un rendimiento específico de entre 0,5 y 15 $m^3/h/m$ y valores de resistividad de acuíferos de 14 a 79 ohm.m. Los extraordinarios resultados confirman nuestra interpretación e hipótesis, y validan el modelo conceptual propuesto por Vittecoq et al., 2014.

Palabras clave: *TDEM, HTEM, Resistividad, acuífero volcánico, hidrogeología de isla.*

ABSTRACT

Mayotte Island is a small French overseas territory (374 km²) of the Comoros archipelago in the Indian Ocean. The island is very densely populated with substantial water needs. Understanding the hydrogeological functioning of the island is thus fundamental in order to run appropriate drilling programs. In October 2010 a helicopter-borne geophysical survey (SkyTEM) was flown over the entire island to characterize the resistivity variations for depths of up to 250 m. Cross-correlation of resistivity values with geological and hydrogeological data from 52 boreholes allows demonstrating that the older the formation, the lower its resistivity and transmissivity. The interpretation of the interpolated 3D resistivity model allows

a detailed hydrogeological characterization of the island and a delineation of the extent of the different aquifers. Based on these interpretations, eight new boreholes have been drilled with depth ranging from 80 to 127 m. Seven boreholes were successful, with exploitation yield ranging between 10 and 60 m^3/h, transmissivities between 2.0 10^{-4} and 1.8 10^{-2} m²/s (mean 5.5 10^{-3}), specific yield between 0.5 and 15 m^3/h/m (mean 5) and aquifer resistivity values from 14 to 79 ohm.m. These outstanding results confirm our interpretation and hypothesis, and validate the conceptual model proposed by Vittecoq et al., 2014.

Key words: SkyTEM, HTEM, Resistivity, volcanic aquifer, island hydrogeology

INTRODUCCIÓN

Entender el régimen hidrogeológico de las islas volcánicas resulta esencial si se desea gestionar de manera adecuada los recursos de agua y mejorar el suministro de agua a la población, en particular si se ha vivido un aumento drástico de la misma en las últimas décadas. Sin embargo, en algunas islas los datos geológicos, hidrológicos e hidrogeológicos suelen ser escasos, y la estructura interna de los edificios volcánicos permanece mal delimitada. Ello es particularmente cierto con respecto al régimen hidrogeológico de las islas volcánicas antiguas que resultan de una actividad volcánica multifase bajo la influencia de un clima tropical húmedo, como es la isla de Mayotte, cuya actividad volcánica se extiende desde hace 10 Ma hasta hace 7.000 años. Los estudios hidrogeológicos en islas volcánicas son un reto, debido a las dificultades para acceder a los lugares de estudio (pendientes importantes, vegetación abundante y un número limitado de pistas de acceso) y a la complejidad geológica (variabilidad litológica horizontal y vertical, con meteorización superpuesta).

En esta isla, la utilización de métodos geofísicos aeroportados, como el SkyTEM, electromagnetismo en el dominio del tiempo (TDEM - Sørensen y Auken, 2004) permite hacer frente a las dificultades de acceso. En octubre de 2010 se realizó un estudio de resistividad con helicóptero de toda la isla de Mayotte durante un mes, con una densidad de medición inaudita hasta la fecha en un entorno volcánico (3.000 Km de vuelo). Además, se han recopilado los registros geológicos y los datos hidrogeológicos (identificación de acuíferos, niveles de agua) de 52 pozos (y, en 21 de ellos, se han calculado las características hidrodinámicas).

Un estudio multidisciplinario, que combina geofísica, geología e hidrogeología (Vittecoq et al., 2014), ha permitido mejorar el conocimiento del régimen hidrogeológico de la isla de Mayotte y proponer un modelo conceptual adaptado y una cartografía de la extensión de las formaciones hidrogeológicas.

Dicho modelo se caracteriza por la realidad "fragmentada" de la isla, resultado de su compleja historia geológica (varios edificios volcánicos, varias fases de construcción y erosión). Este estudio también establecido correlaciones entre la antigüedad de las formaciones geológicas, su transmisividad y su resistividad: cuanto más antigua es la formación, menor es su resistividad y su transmisividad. Ademas, las resistividades de los acuíferos oscilan entre 6 y 186 Ω.m, y los acuíferos atravesados por pozos están asociados principalmente a resistividades de entre 6 y 75 Ω.m.

Según las interpretaciones obtenidas, se perforaron ocho nuevos pozos con el fin de confirmar la interpretación y la hipótesis de partida; y se presentaran aquí los principales resultados.

ISLA DE MAYOTTE

Mayotte se sitúa en el archipiélago de las Comoras, al oeste del océano Índico. Con una población que se ha multiplicado por cuatro en los últimos 30 años (212.645 habitantes en el 2012 - 570 habitantes/km²). Por consiguiente, las necesidades de agua son considerables. La producción de 8,2 millones de m^3 al año corresponde a un consumo de unos 106 l/día/cápita. Mayotte está compuesta por una isla principal (362 km²) que alcanza una altitud de 660 m, conocida como Grande Terre, y una isla más pequeña (12 km²) cuya cima alcanza los 203 m, conocida como Petite Terre. Alrededor del 60% de la morfología de la isla consiste en colinas empinadas con una altitud media de más de 300 m y pendientes superiores al 15%.

El clima de la isla es tropical marítimo húmedo (Lapègue, 1999) con una estación seca y una estación húmeda separadas por dos entretiempos más cortos. La precipitación interanual media es de 1.500 mm (a 100 m de altitud) con variaciones entre 1.000 y 2.000 mm, en función de la altitud. La temperatura anual media es de en torno a 26°C en la costa y baja en el interior a medida que aumenta la altitud.

Mayotte se eleva 4.400 m por encima del fundo del mar (Audru et al., 2006) y consistente principalmente de basalto, basanita, fonolita y basalto alterado. La isla está formada por tres complejos volcánicos principales (Debeuf, 2004; Nehlig et al., 2013; Lacquement et al., 2013): (1) un complejo sur (de 10 Ma a 1,95 Ma), caracterizado por una morfología de relieve viejo; (2) un complejo noroeste (de 8 Ma a 0,8 Ma) con una morfología más joven, marcada por colinas empinadas y que representa la fase de construcción de un volcán en escudo norte; y (3) un complejo noreste, el más reciente (de 2,7 Ma a 0,15 Ma), marcado por basalto volcánico erosionado y sustrato de fonolita (de 2,7 Ma a 1,2 Ma) coronado por los dos macizos más jóvenes. La actividad volcánica terminó (entre 0,15 Ma y -7.000 años) con una serie de eventos freátomagmáticos centrados en el litoral noreste de Grande Terre, y cuyos productos (depósitos de piedra pómez y de ceniza que se depositaron en torno a los maars) forman la mayor parte de Petite Terre. Stieltjes (1982) estableció un mapa geológico de las formaciones volcánicas y Nehlig et al., (2013) un mapa geológico de las formaciones superficiales. Éstos muestran alteritas (con una profundidad media de 10 a 30 m) en más del 70% de la isla.

METODOLOGÍA

El estudio geofísico con helicóptero utilizando el sistema SkyTEM (TDEM) se realizó sobre la isla de Mayotte en octubre de 2010 y permite la caracterización de las variaciones de resistividad en profundidades de hasta 250 m. La implantación de los pozos se basa en el modelo conceptual y la cartografía de los distintos acuíferos propuestos por Vittecoq et al., 2014. Las resistividades de los acuíferos de Mayotte dependen de la edad de las formaciones geológicas y varían mayoritariamente entre 6 y 75 ohm.m. Dentro de esta gama, se ha puesto de manifiesto que cuanto más elevada resulta la resistividad, más permeable será el acuífero. De este modo, las perforaciónes se realizan preferiblemente en las capas más resistentes en el seno de este intervalo. Ya se han realizado varios cortes de resistividades a partir de los datos geofísicos aeroportados, con el fin de determinar los lugares de implantación de nuevos pozos. La figura 1 muestra algunos ejemplos de cortes representativos que presentan el corte de resistividad y la posición de los nuevos pozos.

Se han implantado seis pozos en basaltos Plio-Pleistoceno, formaciones identificadas como las más permeables: dos en el edificio volcánico situado en el noroeste de la isla, en sectores que presentaban importantes capas de basaltos (100 a 200 m), tres en el edificio volcánico del noreste de la isla, en el seno de acuíferos suspendidos de capas más

reducidas (25 a 60 m) y uno en el sur de la isla, en un sector en el que supuestamente había un acuífero a una profundidad de entre 50 y 100 m. Los dos últimos se han realizado en otros dos tipos de formaciones supuestamente acuíferas pero de propiedades hidrodinámicas menos favorables. El primero se perforó en formaciones volcanoclasticas al oeste de la isla, pues esas formaciones heterogéneas podían presentar localmente propiedades hidrodinámicas interesantes. El último se perforó en el sur de la isla, en basaltos Mioceno alterados, situándose en el fondo del valle topográfico y supuestamente en posición posterior a formaciones resistentes supuestamente acuíferas.

Los pozos se realizaron siguiendo el método del martillo de fondo (con aire), con un diámetro de 250 mm, y se equiparon con tubos de PVC de diámetro 176/190 mm. A continuación se realizaron ensayos de bombeo de 72 horas en los nuevos pozos (salvo en el pozo Majimbini F1, cuyo caudal durante la perforación se estimó en menos de 8 m^3/h) y se interpretaron con el programa OUAIP (http://ouaip.brgm.fr/) para calcular las propiedades hidrodinámicas.

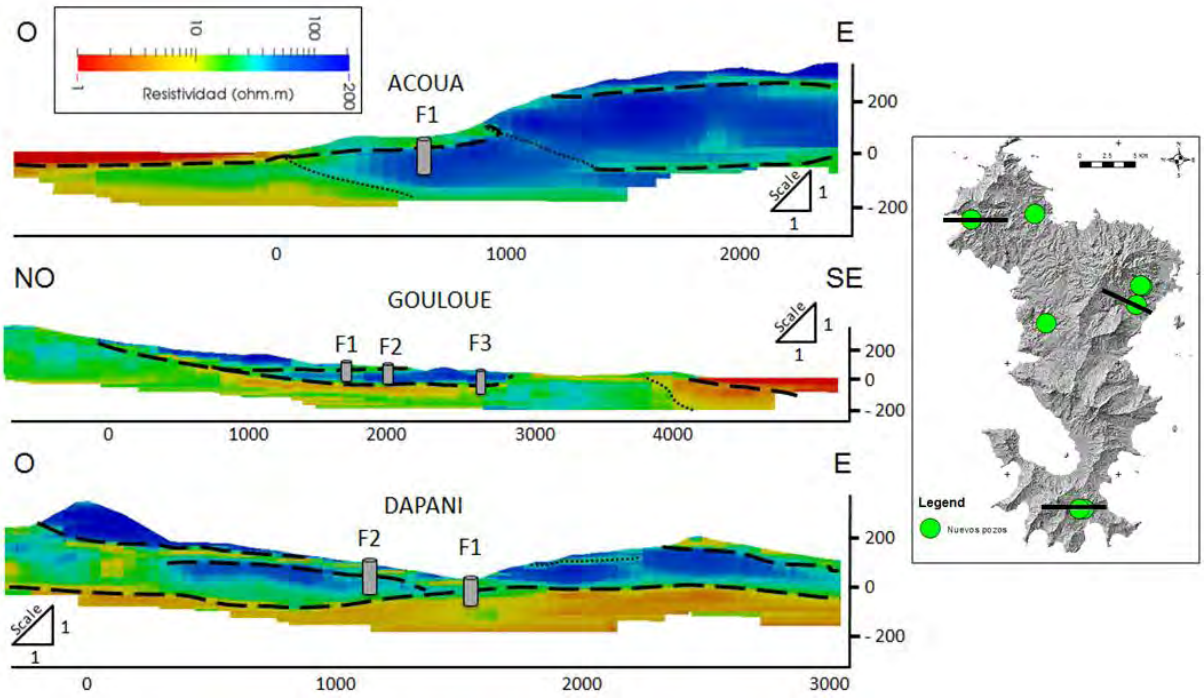


Figura 1: ejemplo de cortes de resistividades previos a la implantación de los pozos. Corte superior: pozo de Accoua (Noroeste). Corte medio: pozo de Gouloué F3 (Noreste), con los dos pozos preexistentes (F1 & F2). Corte inferior: pozos de Dapani (Sur). Las líneas negras subrayan las estructuras principales.

RESULTADOS

Características de los pozos

Se realizaron ocho pozos, cuyas características principales se recopilan en la tabla 1. Las profundidades de los pozos varían entre 80 y 127 m, las transmisividades entre 2,0 10^{-4} y 1,8 10^{-2} m²/s (media 5,5 10^{-3} m²/s), el caudal específico entre 0,5 y 15 m^3/h/m (media 5 m^3/h/m) y la resistividad media del acuífero varía entre 14 y 79 ohm.m (media 35 ohm.m). Por su parte, los caudales operativos calculados varían entre 8 y 60 m^3/h.

Tabla 1: Características de los ocho pozos realizados. La denominación de los acuíferos hace referencia a la clasificación establecida por Vittecoq et al., 2014 (M - basaltos Mioceno alterados a muy alterados, V - formaciones volcanoclásticas Mioceno y Plio-Pleistoceno. Los basaltos Plio-Pleistoceno se dividen en 4 grupos (dependiendo de su altitud y grosor), A - acuíferos gruesos suspendidos, B - acuíferos finos suspendidos, D - acuíferos de basaltos gruesos).

Nombre del pozo	X	Y	Z amsl	Prof. (m)	Nivel piezo-métrico (m amsl)	Acuífero	Prof. acuífero (m)	Resistivi-dad del acuífero (ohm.m)	Caudal específico ($m^3/h/m$)	T (m^2/s)	Caudal operativo (m^3/h)
Acoua F1	506809	8593080	50	116	50	D	46 - 115	79	15,0	1.80E-02	45
Mohogoni F2	512582	8593564	10	80	10	D	30 - 79	37	10,0	6.00E-03	60
Ouroveni F3	513578	8583683	35	86	35	V	46 - 77	15	2,0	1.00E-03	15
Dapani F1	516966	8566852	17	116	17	M	15 - 101	14	2,0	9.40E-04	13
Majimbini F1	522223	8587012	62	127	62	A	30 - 80	43	x	x	<< 8
Majimbini F2	522128	8587074	68	80	68	A	18 - 77	34	3,0	1.10E-03	15
Gouloué F3	521743	8585355	29	109	29	A	45 - 68	38	0,6	2.00E-04	8
Dapani F2	516541	8566892	84	122	84	B	75 - 119	21	5,0	1.10E-02	8

Los dos pozos más productivos (45 y 60 m^3/h) y con las mejores transmisividades (1,2 x 10^{-2} et 6 x 10^{-3} m^2/s) y caudales específicos (10 et 15 $m^3/h/m$) son aquellos realizados en los basaltos Plio-Pleistoceno poco alterados que presentan capas de gran grosor (>100 m), situados en el noroeste de la isla y que corresponden a las formaciones denominadas D en Vittecoq et al., 2014 (uno de los dos es el pozo Acoua F1 en el figura 1). Las resistividades de los acuíferos captados también se encuentran entre las más elevadas (37 et 79 ohm.m). Dichas resistividades y transmisividades corresponden a las esperadas. Asimismo, los dos pozos realizados en los basaltos Mioceno alterados (pozo Dapani F1 en el figura 1) y las formaciones vulcanosedimentarias son menos productivos (13 a 15 m^3/h) y presentan resistividades (14 y 15 ohm.m) y transmisividades (9 10^{-4} y 1 10^{-3} m^2/s) mucho más bajas.

Los dos pozos realizados en Majimbini, en el noreste de la isla, han cortado alternativamente basaltos y escorias con llegadas de agua homogéneas en toda la altura. Las resistividades se encuentran en la gama esperada para basaltos Plio-Pleistoceno, pero las propiedades hidrodinámicas de este acuífero son a priori heterogéneas. Aunque el pozo F2 ha sido el único en ser objeto de un bombeo de prueba y mostrar una transmisividad y un caudal específico esperados, el pozo F1, situado 110 m después, presenta llegadas de agua menos importantes, de modo que parece subsistir localmente una heterogeneidad que la resolución de los perfiles de resistividad no permitía discernir.

El pozo Gouloué 3 (pozo F3 en el figura 1), realizado en un valle adyacente y en una entidad hidrogeológica similar (basaltos Plio-Pleistoceno) en posición posterior a los dos pozos preexistentes, presenta valores de resistividad (38 ohm.m) y de transmisividad (2 x 10^{-4} m^2/s) de la misma magnitud que las de los dos pozos preexistentes en el mismo acuífero (31 – 64 ohm.m; 6 x10^{-4} m^2s). Una vez más, se ve validada la correlación entre resistividad, formación geológica y propiedad hidrodinámica.

Por último, el pozo Dapani F2 es atípico, pues sólo ha encontrado una única llegada de agua a 94 m de profundidad. Este pozo perforado en el sur de la isla (pozo Dapani F2 en el figura 1), confirma la presencia de 75 m de basaltos alterados que cubren basaltos no alterados fracturados, en cuyo seno se observó la llegada de agua. El ensayo de bombeo pone de manifiesto una muy buena permeabilidad, pero la recarga limitada y varios límites

estancos parecen limitar la productividad de este pozo.

El índice de éxito de esta campaña de perforación (7/8 – 87%) resulta muy satisfactorio (en particular con respecto a las últimas campañas: 64% - 9/14 en 1999-2000, 69% - 9/13 en 2001-2004 y 25% - 1/4 en 2006), valida las hipótesis de implantación y el modelo conceptual asociado y demuestra la pertinencia del método SkyTEM y de la interpretación asociada.

Actualización de las correlaciones entre transmisividad, naturaleza y antigüedad de las formaciones acuíferas

La figura 2 muestra la frecuencia acumulada de los valores medios de resistividad de los niveles de los acuíferos en los 59 pozos de la isla (incluyendo nuevos pozos). Las formaciones de acuíferos atravesadas tienen resistividades de entre 6 y 186 Ω.m (media, 26 Ω.m; desviación estándar, 26 Ω.m), con un 88% de los valores entre 6 y 79 Ω.m.

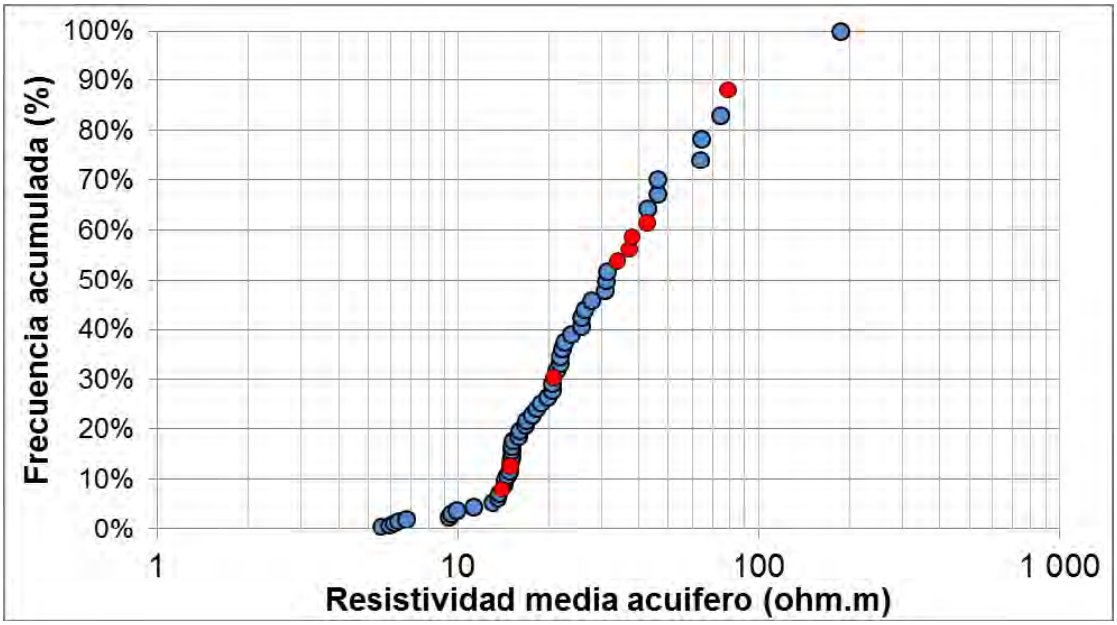


Figura 2: Frecuencia acumulada de valores medios de resistividad (escala logarítmica) de las acuíferos. (Modificada de Vittecoq et al., 2014, los nuevos pozos aparecen en rojo).

Las gamas de transmisividades y de resistividades de los principales acuíferos también se han actualizado y los nuevos pozos se indican en azul en la figura 3. Los basaltos Plio-Pleistoceno tienen una transmisividad mayor ($2{,}10^{-4}$ m²/s a $2{,}10^{-2}$ m²/s) que los basaltos Mioceno alterados ($5{,}10^{-5}$ m²/s a $9{,}10^{-4}$ m²/s), y las formaciones volcanoclásticas mostraron transmisividades intermedias ($8{,}10^{-5}$ m²/s a $2{,}10^{-3}$ m²/s). De modo que cuanto más reciente es la formación, mayor es su transmisividad (Figure 3A). Esta figura 3 confirma la hipótesis defendida por Custodio (2005) sobre la permeabilidad de las formaciones volcánicas basálticas, que se ve reducida con el tiempo debido a los procesos de meteorización, que provocan la arcillación de la roca, al taponar fisuras y fracturas. Además, la figura 3B proporciona las gamas de resistividad de esos grupos litológicos y muestra claramente una reducción de la resistividad en función de la antigüedad de las formaciones en cuestión.

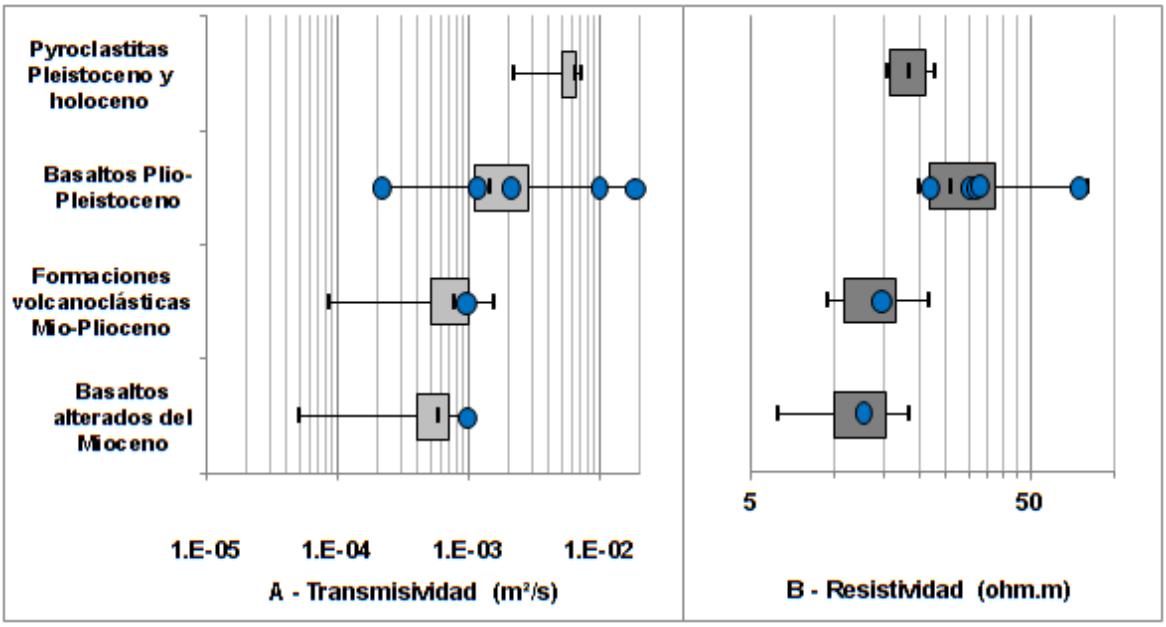


Figura 3: (A) Transmisividad (escala logarítmica) frente a grupos litológicos. Cuanto más reciente es la formación, mayor es la transmisividad. (B) Resistividad (escala logarítmica) frente a grupos litológicos. La resistividad disminuye de acuerdo con la edad de los grupos litológicos. (los contornos de los bloques son el 1er y 3er cuartilos, las líneas negras corresponden al mínimo, máximo y a la media). (Modificado de Vittecoq et al., 2014 - incluyendo nuevos pozos en azules).

CONCLUSIONES

Los resultados de estos pozos son por lo tanto muy satisfactorios, y confirman las hipótesis y correlaciones expresadas por Vittecoq et al., 2014. Se ha confirmado además que las resistividades de los acuíferos atravesados por pozos están asociadas principalmente a resistividades de entre 6 y 79 Ω.m. También se han valido, con ocho nuevos pozos, correlaciones entre la antigüedad de las formaciones geológicas, su transmisividad y su resistividad: cuanto más antigua es la formación, menor es su resistividad y su transmisividad.

Siete de los ocho pozos presentan propiedades hidrodinámicas que permiten contemplar la explotación para la alimentación de agua potable de unas 30.000 personas. También ponen de manifiesto que al menos en un caso (Majimbini F1), la baja productividad del pozo no puede explicarse con los datos disponibles. Los datos geofísicos deben ser considerados como una herramienta fiable que permite mejorar la implantación de pozos, pero manteniendo en mente que la resolución de los datos no siempre permite poner de manifiesto algunas heterogeneidades, y aún menos cuando éstas son de extensión limitada (y por tanto inferiores a la resolución y al espaciado entre las medidas).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha llevado a cabo con el apoyo financiero del SIEAM y BRGM y es una contribución al proyecto de investigación BRGM "Hydrogeolphy".

REFERENCIAS

Audru, J.C.; Guennoc, P.; Thinon, I. y Abellard, O. (2006). *Bathymay: la structure sous-marine de Mayotte révélée par l'imagerie multifaisceaux.* C.R. Geoscience 338, 1240–1249. doi:10.1016/j.crte.2006.07.010

Custodio, E. (2005). *Hydrogeology of volcanic rocks.* In Groundwater studies. An international guide for hydrogeological investigations. UNESCO (Eds), Paris, 423 pp.

Debeuf, D. (2004). *Etude de l'évolution volcano-structurale et magmatique de Mayotte (Archipel des Comores, Océan Indien), approche structurale, pétrographique géochimique et géochronologique).* PhD-Thesis, University of La Réunion, 277 p.

Lacquement, F.; Nehlig, P. y Bernard, J. (2013). *Carte géologique de Mayotte*. BRGM/RP-61803-FR.

Lapègue, J. (1999). *Aspects quantitatifs et qualitatifs de la pluviométrie dans deux enjeux majeurs de la problématique de l'eau à Mayotte : la ressource hydrique et l'assainissement pluvial et l'érosion*. Doctoral thesis, Laboratoire des Sciences de la Terre. PhD-Thesis Université de la Réunion.

Nehlig, P.; Lacquement, F.; Bernard, J.; Caroff, M.; Deparis, J.; Jaouen, T.; Pelleter, A.; Perrin, J.; Prognon, C. y Vittecoq, B. (2013). *Notice de la carte géologique de Mayotte* BRGM/RP-61803-FR.

Sørensen, K.I. & Auken, E. (2004). *SkyTEM - A new high-resolution helicopter transient electromagnetic system.* Explor. Geoph., 35, 191-199.

Stieljes, L. (1982). *Carte géologique de la France : l'île de Mayotte (Archipel des Comores)*. BRGM Service géologique régional de l'océan Indien.

Vittecoq, B.; Deparis, J.; Violette, S.; Jaouen, T. y Lacquement, F. (2014). *Influence of successive phases of volcanic construction and erosion on Mayotte Island's hydrogeological functioning as determined from a helicopter-borne resistivity survey correlated with boreholegeological and permeability data*. Journal of Hydrology, Volume 509, 2014, Pages 519–538 http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.062

ISBN: 978-84-938046-4-0

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE HR-ICP-MS AL ANÁLISIS INORGÁNICO DE AGUAS EN TERRENOS VOLCÁNICOS

Marta REJAS[1], Raúl A. GIL[2,3], Luis D. MARTINEZ[2,3], Julio SAAVEDRA[4], José-Luis FERNANDEZ-TURIEL[1]

[1] labGEOTOP, GEOPAM, ICTJA-CSIC, Barcelona, España mrejas@ictja.csic.es, jlfernandez@ictja.csic.es
[2] Departamento de Patología Animal, Producción Animal y Ciencia y Laboratorio de Espectrometría de Masas, Instituto de Química de San Luis (CCT-San Luis), San Luis, Argentina
[3] Área de Química Analítica, Facultad de Química Bioquímica y Farmacia (UNSL), San Luis, Argentina
[4] IRNASA-CSIC, Salamanca, España

RESUMEN

La técnica de ICP-MS ha supuesto un gran avance en el análisis de aguas en los últimos decenios tal y como recogen las normativas al respecto en Europa, Estados Unidos, etc., habiéndose convertido en una técnica de referencia particularmente en el tema de calidad del agua. La alta resolución aplicada a la ICP-MS reduce considerablemente las interferencias y su combinación con detectores aptos para concentraciones mayoritarias hace que se disponga de una herramienta analítica muy competitiva que permite determinar simultáneamente elementos mayoritarios y trazas, incluidos halógenos (Cl, Br, I), y además relaciones isotópicas (ej., Li y B). Estos aproximadamente 60 parámetros geoquímicos permiten una caracterización exhaustiva de las aguas para temas de calidad y también ayudan a discernir más fácilmente el origen y el tránsito de las aguas a través de diferentes terrenos volcánicos. Por otra parte, la HR-ICP-MS es de gran aplicación a la determinación de los aportes geoquímicos volcanogénicos a los balances biogeoquímicos regionales, como por ejemplo de los materiales piroclásticos, a través del análisis de lixiviados procedentes de la simulación de la interacción del agua *con* estos productos eruptivos. En este trabajo se exponen los pros y contras de la aplicación de la HR-ICP-MS a aguas en problemáticas volcanogénicas a través de diferentes ejemplos (Islandia, Argentina, Chile, etc.). Agradecemos la asistencia del Servicio labGEOTOP (infraestructura cofinanciada por FEDER-UE, Ref. CSIC08-4E-001) del ICTJA-CSIC. La financiación fue proporcionada por QUECA (MINECO, CGL2011-23307). Este estudio se llevó a cabo en el marco del Grupo Reconocido GEOPAM (2014 SGR 869).

ISBN: 978-84-938046-4-0

MODELOS GEOLÓGICOS EN 3D DE LA ISLA DE TENERIFE

Ilazkiñe IRIBARREN RODRÍGUEZ[1]

[1] ICTJA-CSIC, Barcelona, España, ilazkine.iribarren@gmail.com

RESUMEN

Los sistemas de tratamiento de bases de datos, sistemas de información geográfica y modelización en 3D son herramientas comúnmente aplicadas para la recopilación, elaboración, consulta, análisis e implementación de datos geológicos, permitiendo así un acercamiento diferente a la solución de problemas geológicos. En particular, el uso de software específicos para el desarrollo de modelos 3D como RockWorks, GoCad o 3D Geomdeller, está tomando popularidad en estudios geológicos de aspecto hidrogeológico, petrolífero, reservorios geotérmicos… pero no se conoce hasta la fecha la aplicación en volcanología. Esto puede ser debido a la complejidad de los terrenos volcánicos, que se caracterizan por una alta heterogeneidad y cambios litológicos laterales significantes.

Tenerife ofrece uno de los más complejos pero bien expuestos ejemplos de isla oceánica volcánica activa, que durante su construcción subaérea ha padecido grandes eventos destructivos. Esta isla, además, contiene una extensa red de galerías y pozos (más de 1700 km de perforaciones) para la extracción de agua dulce procedente de los acuíferos, que permiten el acceso directo a la geología del subsuelo. La combinación de los datos geológicos del subsuelo con estudios geofísicos representa uno de los más importantes registros geológicos de un sistema volcánico activo. A pesar de esto, el origen de la cadera de Las Cañadas sigue siendo una de las controversias internacionales más extendidas, siendo las hipótesis principales la de deslizamiento lateral y la de una serie de colapsos de caldera.

Haciendo uso de la cartografía geológica, topografía, batimetría, geofísica y todos los datos existentes del registro geológico del subsuelo, se han construido dos modelos teóricos según las dos hipótesis de origen de Las Cañadas con objeto de dilucidar cuál de ellas encaja mejor con el conocimiento actual.

ÁREA TEMÁTICA 3

RECURSOS NO CONVENCIONALES: AGUAS DESALADAS Y DEPURADAS

ISBN: 978-84-938046-4-0

EVALUACIÓN DE LA PRESENCIA DE COMPUESTOS FARMACÉUTICOS EN AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE ESTACIONES DE DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES (EDARS) DE LA ISLA DE GRAN CANARIA

Cristina AFONSO OLIVARES, Rayco GUEDES ALONSO, Sarah MONTESDEOCA ESPONDA, Zoraida SOSA FERRERA y José Juan SANTANA RODRÍGUEZ

Departamento de Química. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. 35017 Las Palmas de Gran Canaria, España. cristina.afonso@ulpgc.es

RESUMEN

En el presente trabajo se ha realizado la evaluación de la concentración de compuestos farmacéuticos de uso común de diferentes grupos terapéuticos tales como, antibióticos, antiinflamatorios, analgésicos, reguladores lipídicos, betabloqueantes, antidepresivos, estimulantes y antiepilépticos, en aguas procedentes de Estaciones de Depuración de Aguas Residuales (EDARs) de la isla de Gran Canaria, con el fin de poner en conocimiento la situación del problema, siendo ésta un paso previo para su posible regulación y remediación. Debido a las bajas concentraciones en que estos compuestos se encuentran en las aguas residuales, para llevar a cabo el estudio, se utilizaron procesos analíticos basados en un pretratamiento de la muestra utilizando la extracción en fase sólida (SPE) y su posterior determinación por técnicas instrumentales de altas prestaciones, como la cromatografía líquida de alta resolución con detector de espectrometría de masas de triple cuadrupolo (LC-MS/MS).

Palabras clave: *fármacos, aguas residuales, EDARs, SPE, LC-MS/MS.*

ABSTRACT

In the present work the concentration of pharmaceutical compounds commonly used from different therapeutic groups such as antibiotics, anti-inflammatories, analgesics, lipid regulators, beta blockers, antidepressants, stimulants and antiepileptics has been evaluated, in water from Wastewater Treatments Plants (WWTPs) of the island of Gran Canaria, in order to inform of the problem situation, this being a prerequisite for possible regulation and remediation. These compounds are found in wastewater at low concentrations, for these situation and to conduct the study, it was used an analytical process based on a pretreatment of the sample, used the Solid Phase Extraction (SPE), and subsequent determination by high-performance instrumental techniques as the liquid chromatography tandem mass spectrometry (LC-MS/MS).

Key words: *pharmaceuticals, wastewater, WWTPs, SPE, LC-MS/MS.*

INTRODUCCIÓN

A pesar de algunas medidas tomadas en España, como son los puntos de recogida de medicamentos y el sistema de recetas electrónica, con las que se ha podido controlar la eliminación de residuos de productos farmacéuticos y disminuir su uso indiscriminado, no son suficientes para evitar su continua entrada y su amplia dispersión en los diferentes compartimentos ambientales. Las principales fuentes de entrada de productos farmacéuticos en el medio acuático son la excreción después de su uso, la eliminación inadecuada de medicamentos no utilizados y, en mucha menor medida, residuos que se generan durante la producción (Afonso et al., 2012). A través de estos canales llegan a las estaciones de depuración de aguas residuales (EDARs), las cuales, en su mayoría, no están diseñadas para eliminar este tipo de residuos, incluso, diferentes estudios han demostrado la limitación del uso exclusivo de los tratamientos primarios para descomponer los productos farmacéuticos (Ghoshdastidar et al., 2014) y se hace necesaria la utilización de tratamientos secundarios y terciarios, tales como: osmosis inversa, biorreactor de membrana, procesos de oxidación avanzada, etc. (Luo et al., 2014).

Los fármacos forman parte de la larga lista de contaminantes emergentes (Richardson, 2009), que son aquellos contaminantes que no han sido regulados pero podrán ser candidatos a serlo en un futuro, dependiendo de las investigaciones que se realicen sobre su presencia en el medioambiente y sus posibles efectos sobre la salud. Solo tres de los numerosos fármacos usados (17β-estradiol, 17α-etinilestradiol y diclofenaco) están en proceso de ser incluidos por la Unión Europea en la primera “Watch List”.

Estos microcontaminantes se presentan comúnmente a niveles trazas, en un rango de concentraciones comprendidos entre $ng \cdot L^{-1}$ hasta $\mu g \cdot L^{-1}$, sin embargo, su permanente descarga en el medio acuático pueden plantear riesgos potenciales a largo plazo para los organismos acuáticos y terrestres (Fadário et al., 2014). Debido a la persistencia que poseen estos tipos de contaminantes, su presencia en el medio acuático está frecuentemente relacionado con un número de efectos negativos, incluyendo: toxicidad a largo y corto plazo, efectos de disrupción endocrina y microorganismos resistentes a los antibióticos (Luo et al., 2014).

Diversos estudios han evaluado la presencia de compuestos farmacéuticos en diferentes medios acuáticos. Carmona et al., 2014 realiza un trabajo sobre la presencia de estos contaminantes en diferentes matrices que incluyen, aguas superficiales (máxima concentración 830 $ng \cdot L^{-1}$), aguas residuales (concentraciones máximas para influente y efluente 4374 y 753 $ng \cdot L^{-1}$, respectivamente) e incluso, agua potable (hasta 40 $ng \cdot L^{-1}$). Las bajas concentraciones encontradas, niveles trazas, se han podido evaluar gracias a los avances en las metodologías analíticas, ya que resulta necesario el uso de métodos analíticos que sean altamente sensibles y selectivos. Existen diversos métodos, pero el más ampliamente utilizado para el análisis de este tipo de compuesto es la cromatografía líquida con detección por espectrometría de masas (LC-MS), usando como fuente de ionización la electrospray (ESI). A pesar de la sensibilidad que presentan estos sistemas, además, es necesario un pretratamiento de la muestra para extraer y preconcentrar los analitos, la técnica más usada es la extracción en fase sólida (SPE) (Kaplan 2013).

El objetivo de este trabajo ha sido la evaluación de un total de 16 compuestos farmacéuticos de diferentes grupos terapéuticos en muestras de agua residuales, mediante el monitoreo de dos estaciones de depuración de aguas residuales (EDARs), con diferentes tratamientos, procedentes de la isla de Gran Canaria. Los compuestos seleccionados, sus aplicaciones y características se han resumido en la Tabla 1. Para poder realizar la evaluación se ha usado una metodología analítica basada en la extracción en fase sólida (SPE) y la cromatografía líquida de alta resolución y ultraresolución con detección por

espectrometría de masas (LC-MS y UHPLC-MS).

Tabla 1. Lista de compuestos farmacéuticos, identificación del grupo terapéutico, valores de pK_a.

Grupo terapéutico	Compuesto	pK_a*
Antibióticos	Norfloxacina	0.16 ± 0.20
	Ciprofloxacina	6.43 ± 0.41
	Enrofloxacina	6.43 ± 0.41
	Sarafloxacina	6.17 ± 0.41
	Levofloxacina	5.19 ± 0.40
Antiinflamatorios	Ketoprofeno	4.23 ± 0.10
	Naproxeno	4.84 ± 0.30
Analgésico	Metamizol	-
Reguladores lipídicos	Bezafibrato	3.29 ± 0.10
	Ácido clofíbrico	3.18 ± 0.10
Antidepresivo	Fluoxetina	10.05 ± 0.10 (Most Basic)
Anticonvulsivo	Carbamazepina	13.94 ± 0.20
Beta-bloqueante	Atenolol	13.88 ± 0.20
Estimulantes	Paraxantina	8.50 ± 0.50
	Cafeína	0.52 ± 0.70 (Most Basic)
	Nicotina	8.00 ± 0.50 (Most Basic)

*Base de datos SciFinder.

MATERIALES Y MÉTODOS

Reactivos

Todos los compuestos farmacéuticos utilizados en el estudio han sido adquiridos de Sigma-Aldrich (Madrid, España). Las disoluciones patrón se prepararon disolviendo cada analito en metanol a una concentración de 1000 $mg \cdot L^{-1}$, y se almacenaron en botes de cristal ámbar a 4°C. Diariamente se preparaban las disoluciones de trabajo a partir de la anterior. El agua ultrapura se obtenía con un sistema Milli-Q (Millipore, Bedford, MA, EE.UU.). El metanol de calidades HPLC y LC-MS, el agua de calidad LC-MS, así como el ácido fórmico y el formiato amónico utilizado para ajustar el pH de las fases móviles se obtuvieron de Panreac Química (Barcelona, España). Polyoxyethylene 10 lauryl eter (POLE) fue suministrado por Sigma-Aldrich (Madrid, España) y se preparaba en agua Milli-Q.

Recogida de muestras

El muestreo se ha realizado durante dos años con una frecuencia bimensual. Los puntos de toma de muestra estaban ubicados en los efluentes de dos EDARs procedentes de la isla de Gran Canaria. EDAR 1 utiliza un sistema de tratamiento de lodos activos convencional, mientras que EDAR 2 posee un sistema de tratamiento de biorreactor de membrana. Las muestras de agua se recogían en botellas de vidrio ámbar de 2L, que se lavaban previamente con metanol y agua. A continuación, las muestran se filtran a través de filtros de fibra de vidrio y filtros de membrana de 0,65µm y son almacenadas en la oscuridad a 4ºC, realizando el análisis dentro de las 48 horas después de su recogida.

Instrumentación

Para el análisis de todos los compuestos farmacéuticos de este estudio, excepto el grupo de antibióticos (fluoroquinolonas), se utilizó un cromatógrafo líquido de alta resolución con detección por espectrometría de masas de triple cuadrupolo (LC-MS/MS) equipado con una interfaz de ionización por electrospray (ESI). Las fases móviles utilizadas fueron agua que contiene ácido fórmico al 0,2 % y 5 mM de formiato amónico a un pH de 2,6 y metanol.

Para el análisis de las fluoroquinolonas se usó la cromatografía líquida de ultraresolución con detección por espectrometría de masas de triple cuadrupolo (UHPLC-MS/MS) con interfaz de ionización por electrospray. Las fases móviles fueron agua, ajustado a un pH de 2,5 con 0,1 % de ácido fórmico (v/v), y metanol. Las columnas cromatográficas utilizadas en todos los casos presentan una fase estacionaria con una estructura C_{18}.

Debido a las bajas concentraciones en la que estos compuestos se encuentran en muestras de agua, antes de realizar su determinación es necesario un proceso de extracción, la técnica utilizada ha sido la extracción en fase sólida (SPE). Las condiciones de SPE fueron optimizadas en estudios previos (Afonso et al., 2012, Guedes et al., 2013, Montesdeoca et al., 2012). El cartucho de extracción utilizado para todos los compuestos seleccionados, incluidas las fluoroquinolonas, fue el OASIS HLB (Waters, Spain). Sin embargo, el eluyente es diferente en cada caso, para los antibióticos se realizó la elución con medios micelares, y para los demás fármacos el eluyente usado ha sido el metanol. Las condiciones de extracción permiten un factor de preconcentración en el rango de 200-250 veces.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizó un monitoreo bimensual con una duración de dos años, cuyo punto de muestreo fueron los efluentes procedentes de dos depuradoras localizadas en la isla de Gran Canaria. Cada muestra de agua depurada se analizó mediante la combinación del proceso de extracción SPE y la cromatografía líquida de alta o de ultra resolución con detección por espectrometría de masas, siguiendo el protocolo de análisis para cada compuesto. Tanto la EDAR 1 (tratamiento de lodos activos, 500 m^3/día) como la EDAR 2 (tratamiento de biorreactor de membrana, 700 m^3/día), operan diariamente con similares velocidades de flujo volumétricas de influente de aguas residuales y el tratamiento se realiza en poblaciones con un número de habitantes análogos (5000 habitantes para EDAR 1 y 7000 habitantes para EDAR 2), por lo tanto, puede ser viable la comparación entre los tratamientos de las diferentes depuradoras, a pesar de no tener datos sobre las concentraciones de los mismos compuestos en los influentes.

Los resultados medios obtenidos se resumen en la Tabla 2 en la cual se muestra el rango de concentraciones que se han podido determinar de cada compuesto con las desviaciones estándar relativas correspondientes al análisis por triplicado de cada muestra ($ng \cdot L^{-1}$) para cada una de las depuradas estudiadas, además, se incluyen los límites de detección (LOD) para cada compuesto.

Podemos observar que, en términos generales, se ha encontrado la presencia de todos los compuestos escogidos para este estudio, excepto la enrofloxacina, sarafloxacina y fluoxetina, que no fueron determinados o se encontraban por debajo de los límites de detección en todas las muestras analizadas durante el periodo de muestreo. Sólo la carbamazepina fue encontrada en todas las muestras de ambas depuradoras en el rango de concentraciones 18,9-974,5 $ng \cdot L^{-1}$, y el ketoprofeno se detectó en todas las muestras de la EDAR 1. Es importante destacar las altas concentraciones de paraxantina encontradas en la

mayoría de muestras de la EDAR 1 cuyo máximo de concentración fue 58,7 $\mu g \cdot L^{-1}$. Las altas concentraciones detectadas de paraxantina podrían ser explicadas por el hecho de que se trata de un metabolito de la cafeína que es excretado por el cuerpo humano.

Tabla 2. Rango de concentraciones ($ng \cdot L^{-1}$) determinados en las aguas procedentes de los efluentes de las EDARs estudiadas.

Compuesto	***LOD[b] ($ng \cdot L^{-1}$)***	***Rango de concentración ± RSD ($ng \cdot L^{-1}$)[a]***	
		EDAR 1	**EDAR 2**
Norfloxacina	8,5	<LOD – 2366,0 ± 149,8	<LOD – 2249,4 ± 279,8
Ciprofloxacina	8,6	<LOD – 20321,3 ± 1806,7	<LOD – 259,2 ± 87,7
Enrofloxacina	5,3	<LOD	<LOD
Sarafloxacina	11,1	<LOD	<LOD
Levofloxacina	9,1	<LOD – 7206,3 ± 319,9	<LOD – 14154,2 ± 916,5
Ketoprofeno	2,4	69,1 ± 11,7 – 1360,5 ± 30,3	<LOD – 381,3 ± 50,2
Naproxeno	0,6	<LOD – 1069,1 ± 97,9	<LOD – 220,3 ± 21,3
Metamizol	6,3	<LOD – 6782,3 ± 508,0	<LOD – 8250,1 ± 186,5
Bezafibrato	2,9	<LOD – 18850,7 ± 3257,4	<LOD – 18680,3 ± 803,3
Ácido clofíbrico	10,7	<LOD – 282,8 ± 6,2	<LOD – 258,7 ± 24,5
Fluoxetina	97,4	<LOD	<LOD
Carbamazepina	0,3	18,9 ± 0,1– 505,0 ± 12,4	70,1 ± 6,7– 974,5 ± 37,2
Atenolol	7,9	<LOD – 2498,2 ± 27,5	<LOD – 237,3 ± 40,4
Paraxantina	2,2	<LOD – 58691,1 ± 5693,0	<LOD – 2249,8 ± 172,8
Cafeína	6,8	<LOD – 4307,9 ± 870,6	<LOD – 1106,6 ± 125,5
Nicotina	6,5	<LOD – 981,4 ± 12,6	<LOD – 531,1 ± 14,2

a n=3; RSD: *Relative Standar Desviation* (Desviación Estándar Relativa).
b LOD: *Limit of detection* (Límite de detección)

Comparando ambas depuradoras, las concentraciones de fármacos detectadas en la estación depuradora que opera con un tratamiento de biorreactor de membrana (EDAR 2) son, de manera general (excepto para levofloxacina, metamizol y carbamacepina), más bajas que las encontradas con la depuradora que opera de manera tradicional con la técnica de lodos activos. Sin embargo, hay compuestos que se mantienen más constantes en ambas depuradoras, como es el caso de norfloxacina, bezafibrato y ácido clofíbrico, por lo que no les influye el sistema de tratamiento.

En un análisis global, las concentraciones de los diferentes fármacos en estudio no siguen ningún patrón de comportamiento para ninguna de las dos depuradoras estudiadas, obteniendo resultados, para mucho de ellos, muy variables durante todo el periodo de muestreo. A pesar de ello, se puede observar que en la técnica de biorreactor de membrana se han determinado menos compuestos que en la técnica de lodos activos.

CONCLUSIONES

Se ha realizado el estudio de la presencia de cinco fluoroquinolonas (levofloxacina, norfloxacina, ciprofloxacina, enrofloxacina y sarafloxacina) y once compuestos

farmacéuticos de uso común (ketoprofeno, naproxeno, metamizol, bezafibrato, ácido clofíbrico, fluoxetina, carbamacepina, atenolol, paraxantina, cafeína y nicotina) en muestras de aguas residuales procedentes de dos estaciones de depuración de aguas residuales (EDARs) de la isla de Gran Canaria. Las muestras de efluentes de aguas residuales fueron recogidas cada dos meses durante dos años. Durante el periodo de monitoreo, existía la presencia en concentraciones muy variables de todos los compuestos, excepto enrofloxacina, sarafloxacina y fluoxetina, además, sólo la carbamacepina fue encontrada en todas las muestras analizadas de ambas depuradoras, y el ketoprofeno en todas las muestras de la EDAR 1. Los resultados muestran que la eliminación de los compuestos analizados es incompleta y, a pesar de no tener datos procedentes de los influentes, el tratamiento por biorreactor de membrana nos muestra concentraciones más bajas para la mayoría de los compuestos que en el tratamiento de lodos activos.

Los resultados obtenidos en este monitoreo pueden ser útiles para poner en conocimientos a los diferentes órganos de regulación, con el propósito de que en futuras reglamentaciones sea incluida una lista de productos farmacéuticos en el seguimiento de la calidad de las aguas.

AGRADECIMIENTOS

La autora Cristina Afonso Olivares agradece al Ministerio de Educación, Cultura y Deporte por la ayuda concedida del programa de Formación del Profesorado Universitario en la convocatoria de 2013.

REFERENCIAS

Afonso-Olivares, C.; Sosa-Ferrera, Z.; Santana-Rodríguez, J.J. (2012). *Analysis of antiinflammatory, analgesic, stimulant and antidepressant drugs in purified water from wastewater treatment plants using SPE-LC tandem mass spectrometry.* Journal of Environmental Science and Health A 47: 887–895.

Carmona, E.; Andreu, V.; Picó, Y. (2014). *Occurrence of acidic pharmaceuticals and personal care products in Turia River Basin: from waste to drinking water*. Science of the Total Environment 484: 53-63.

Fadário, V.M.; Dias, M.; Costa, A.C.S.; Alves, M.S. (2014). *Environmental contamination by fluoroquinolones.* Brazilian Journal of Pharmaceutical Science 50: 41-54

Ghoshdastidar, A.J.; Fox, S.; Tong, A.Z. (2014). *The presence of the top prescribed pharmaceuticals in treated sewage effluents and receiving Waters in Southwest Nova Scotia, Canada.* Environmental Science and Pollution Research DOI 10.1007/s11356-014-3400-z.

Guedes-Alonso, R.; Afonso-Olivares, C.; Montesdeoca-Esponda, S.; Sosa-Ferrera, Z.; Santana-Rodrígez, J.J. (2013) *An assessment of the concentrations of pharmaceutical compounds in wastewater treatment plants on the island of Gran Canaria (Spain).* SpringerPlus 2: 1-8.

Kaplan, S. (2013). *Review: Pharmacological pollution in water*. Critical Reviews in Environmental Science and Technology 43: 1074-1116.

Luo, Y.; Guo, W.; Ngo, H.H.; Nghiem, L.D.; Hai, F.I.; Zhang, J.; Liang, S.; Wang, X.C. (2014). *A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment.* Science of the Total Environment 473-474: 619-641.

Montesdeoca-Esponda, S.; Sosa-Ferrera, Z.; Santana-Rodríguez, J.J. (2012) *Comparison of solid*

phase extraction using micellar desorption combined with LC-FD and LCMS/MS in the determination of antibiotic fluoroquinolone residues in sewage samples. Journal of Liquid Chromatography & Related Technologies, 35: 2081-2096.

Richardson, S.D. (2009). *Water analysis: emerging contaminants and current issues.* Analytical Chemistry 81: 4645-4677.

ISBN: 978-84-938046-4-0

ESTUDIO DEL USO DE TRITURADO DE PALMERA COMO SUSTRATO DE HUMEDALES DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.

Alejandro BORREGUERO FABELO, José Alberto HERRERA MELIÁN, Javier ARAÑA MESA y Alejandro ORTEGA MÉNDEZ.

CIDIA-FEAM-Dpto. de Química, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Campus Universitario de Tafira, 35017, Las Palmas de Gran Canaria, España. alejandro.borreguero101@alu.ulpgc.es; jherrera@dqui.ulpgc.es; javier.arana@ulpgc.es; jaortegamendez@gmail.com;

RESUMEN

Se ha hecho uso de un sustrato orgánico (triturado de palmera) en humedales artificiales para comprobar su idoneidad para el tratamiento de las aguas residuales, tanto en flujo vertical como horizontal y mixto, teniendo en cuenta la eficiencia de eliminación de los parámetros recogidos en la normativa y la posible obturación. Con este sustrato se consiguieron eliminaciones de entre el 80 y el 90% de materia orgánica, más del 98% de eliminación de sólidos en suspensión y turbidez y en torno al 99.9% de eliminación de coliformes fecales. Las conclusiones que se extrajeron del estudio son, en cuanto a los humedales primarios, el funcionamiento más eficiente y robusto de un humedal vertical, aun obturándose, frente al horizontal y al mixto. Por otro lado, en los humedales secundarios se observó un mejor comportamiento del humedal vertical con picado de palmera que de los verticales con grava y picón y que del horizontal con sustrato mineral.

Palabras clave: *Humedal artificial, sustrato orgánico, obturación.*

ABSTRACT

In this study, palm tree mulch was used as substrate in treatment wetlands to prove its suitability to treat raw water in vertical flow as well as in horizontal and hybrid flow, paying attention not only to the elimination efficiency but also to the possible clogging effect. The results were a reduction in organic matter about 80-90%, more than 98% in suspended solids and turbidity and around 99.9% in fecal coliforms elimination. The result from this study shown the mulch used as substrate in wetlands for wastewater treatment is as valid or more than conventional substrate. In the Primary TW, a vertical wetland, although clogging, worked almost like a horizontal one. In the Secondary TW, a vertical wetland with mulch performed better than others with gravels as substrate and a horizontal wetland with gravel and sand.

Key words: *Treatment wetland, organic substrate, clogging.*

INTRODUCCIÓN

Los humedales artificiales son un tipo de Sistema de Depuración Natural (SDN) que imita las condiciones de los humedales naturales. Consisten en lagunas o canales poco profundos que suelen estar plantados con especies propias de zonas húmedas y con un sustrato que provee una superficie sobre la que se pueden fijar las bacterias y además actúa en la eliminación de sólidos en suspensión debido a la filtración que tiene lugar en el proceso (Knight y Kadlec, 1996).

Los humedales pueden tener diferentes diseños, como pueden ser los de flujo libre o los de flujo subsuperficial. Los humedales de flujo libre son estanques o canales en los que el agua se encuentra expuesta a la atmósfera y las plantas emergentes se encuentran enraizadas en una capa impermeable. La alimentación en estos sistemas suele ser continua y las aguas residuales a tratar provienen normalmente de un tratamiento secundario previo.

En cuanto a los humedales de flujo subsuperficial, son estanques o canales con el fondo generalmente impermeable sobre el cual se coloca un medio poroso como arena o grava, en el que se enraízan las plantas. Si el flujo es horizontal, el sustrato se mantiene saturado por el agua mientras que si el flujo es vertical, el sustrato no se encuentra saturado ya que normalmente el régimen hidráulico usado es discontinuo, lo que permite que el agua percole a través del medio de forma similar a lo que sucede en un filtro de arena. Uno de los principales problemas de los humedales con flujo subsuperficial es la obturación del lecho (Knowles et al., 2011), por lo que es necesario un tratamiento previo del influente para eliminar en la medida de lo posible las grasas, aceites, arenas y sólidos en suspensión y así poder prolongar la vida útil del humedal.

En cuanto a las ventajas que presentan los SDN frente a los tratamientos convencionales, destaca la robustez de los sistemas frente a las variaciones de caudal y carga, la simplicidad en su funcionamiento, el casi nulo consumo energético (nulo si el agua residual se traslada por gravedad), integración paisajística en el entorno rural y en el caso de flujo subsuperficial, inexistencia de malos olores y la no proliferación de mosquitos.

Por otro lado, en lo que respecta a los inconvenientes, destaca la mayor superficie necesaria para su implantación en relación a los tratamientos convencionales, la posibilidad de obturación en los humedales de flujo subsuperficial, y en el caso de flujo libre, la posible generación de malos olores y la presencia de mosquitos (Proyecto DEPURANAT, 2006).

Los sustratos típicos usados en los humedales de los que estamos hablando son la grava y la arena. Además de los sustratos minerales, se pueden usar sustratos orgánicos en los humedales artificiales. Aunque no existe mucha bibliografía que trate estos sistemas, se han hecho algunos experimentos usando compost (Aslam, 2007), cáscara de arroz (Tee et al., 2009) y acolchado de madera (Saeed y Sun, 2011) o palma entre otros. Las ventajas de los sustratos orgánicos, desde un punto de vista medioambiental, reside en la reutilización que se hace de un residuo que es muy abundante y que en muchas ocasiones supone un riesgo de incendios forestales. Por otro lado, también es capaz de adsorber compuestos orgánicos, proveer una mayor superficie para el crecimiento de las colonias de microorganismos y debido a su mayor porosidad, se reduce el riesgo de obturación.

El Campus de Tafira de la ULPGC cuenta con uno de los palmerales de palmera canaria (*Phoenix canariensis*) más interesantes de Gran Canaria. De forma periódica se procede a la limpieza de hojas secas de palmera que, una vez trituradas pueden ser empleadas de diversas maneras entre las que destaca el uso como enmienda orgánica para suelos de cultivo o como base para producir compost.

Este material orgánico a base de pencas de palmera trituradas (picado) puede ser empleado como sustrato en humedales de tratamiento de aguas residuales, bien parcialmente en un prefiltro, cuyo objetivo sería la eliminación de sólidos en suspensión que reduzcan el riesgo de obturación del resto del humedal, o bien totalmente, de forma que sustituyan a la arena y la grava.

OBJETIVOS

Los objetivos de este estudio son:

1. Respecto a los Humedales Primarios: Determinar el efecto del régimen hidráulico, comparando el comportamiento del sustrato orgánico en humedales de flujo vertical (VF), horizontal (HF) y mixto (HyF), empleando altas cargas superficiales para estudiar su funcionamiento en estas condiciones. El VF fue sometido altas cargas superficiales durante seis meses para determinar su comportamiento en esas condiciones y después de obturarlo (VF1-obt).

2. Respecto a los Humedales Secundarios: Comparar el funcionamiento de los humedales verticales de grava (VFg), picado de palmera (VFp), picón (VFpi) y el horizontal mineral (HFmin).

MATERIAL Y MÉTODO

Descripción de los reactores

Humedales Primarios

Los humedales empleados en este estudio fueron recipientes de plástico de 70 y 260 L, es decir, reactores de pequeña escala o microcosmos, y están ubicados al aire libre en el Campus de Tafira de la ULPGC, tratando agua residual cruda sin pretratamiento recibida desde la parte alta de éste y con orígenes tan dispares como los relacionados con la actividad docente, laboratorios, instalaciones deportivas, comedor o cafeterías.

Se emplearon dos reactores primarios, ambos con triturado de palmera como sustrato, pero uno de flujo vertical (VF1) y otro de flujo híbrido (HyF1). El reactor primario (HFy1) había sido previamente empleado con flujo horizontal (HF1).

Humedales secundarios

El caudal que sale del HyF1 es recogido en un recipiente desde donde se bombea de forma que una parte se lleva al humedal secundario horizontal mineral (HFmin), otra a dos humedales verticales, uno con grava (VFg) y el otro con picado de palmera (VFp), y una cuarta parte va a un reactor de flujo vertical con grava volcánica o picón (VFpi).

Parámetros analizados: importancia e interpretación

Los parámetros analizados fueron la DBO_5, DQO, sólidos en suspensión, turbidez, fosfatos, amonio, coliformes fecales, sodio, pH, conductividad eléctrica y dureza permanente, que son las principales medidas que se tienen en cuenta en la normativa para determinar la posible reutilización del agua tratada.

RESULTADOS

Descripción del agua a tratar

Las aguas a tratar fueron las aguas residuales generadas en la parte alta del Campus de Tafira, que comprenden las aguas de cafeterías, laboratorios, baños y centros deportivos. Esta agua es tomada de una arqueta de 17 m^3, en la que se encuentra una bomba trituradora, controlada por un temporizador. El temporizador permitió programar el régimen hidráulico aplicado a los reactores. Las características son las que se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de las aguas residuales del Campus de Tafira, según las medidas realizadas en este estudio, de enero de 2013 a julio de 2014. Se dan concentraciones medias ± desviación estándar y número de datos (n).

Parámetros	Valor
DBO_5 (mg/L de O_2)	**444 ± 131, n: 59**
DQO (mg/L de O_2)	**552± 162, n: 71**
SS (mg/L)	**252 ± 133, n: 64**
Turbidez (UNT)	**209 ± 97, n: 82**
Amonio (mg/L)	**68 ± 21, n: 60**
Fosfatos (mg/L)	**34 ± 8, n: 18**
Colis fecales (UFC/100 mL)	**1.91 (± 1.48)·10^7, n: 15**
Na^+ (mg/L)	**155 ± 40, n: 10**
pH (Unidades de pH)	**6.93 ± 0.27, n: 29**
Ce (mS/cm)	**1665 ± 590, n: 29**
Dureza permanente (Ca+Mg) (meq/L)	**1.91 ± 0.22, n: 10**
RAS	**7.2 ± 1.4, n: 8**

Resultados de los Humedales Primarios

La Tabla 2 muestra los valores medios (± desviación estándar y número de datos, n) de las cargas superficiales hidráulicas (HLR) y las eficiencias de eliminación de los parámetros estudiados, en los distintos reactores durante el período de estudio.

Tabla 2. Cargas superficiales medias aplicadas (valor ± desviación estándar) y eficiencias (% de remoción) obtenidas por los Humedales Primarios. Las unidades de la carga hidráulica (HLR) son L/m^2d, las de carga superficial de turbidez son NTUxL/m^2d, las de coliformes fecales son UFC/m^2d y las demás son g/m^2d.

Carga ± desv std *Remoción (%)*	**HF1**	**HyF1**	**VF1**	**VF1-obt**
HLR	**147 ± 65**	**134 ± 46**	**412 ± 107**	**132 ± 65**
DBO_5	**71 ± 20** *61*	**53 ± 23** *80*	**266 ± 146** *83*	**62 ± 27** *81*
DQO	**86 ± 29** *64*	**100 ± 44** *58*	**317 ± 104** *78*	**75 ± 44** *60*
SS	**35 ± 15** *85*	**35 ± 23** *84*	**154 ± 62** *95*	**38 ± 27** *83*
Turbidez	**29 ± 12** *77*	**34 ± 16** *75*	**98 ± 45** *70*	**38 ± 22** *65*
NH_4^+	**11 ± 4** *-13*	**8 ± 2** *-26*	**33 ± 10** *33*	**10 ± 5** *-33*
Fosfatos	**-**	**4 ± 1** *-10*	**-**	**5 ± 2** *-13*
Coliformes fecales	-	**2.6 (± 2.3)x10^{10}** *90*	-	**2.1 (± 1.4)x10^{10}** *86*

Los resultados referentes a la DQO (Figura 1) muestran que el VF1 (78%) fue más eficiente que el HF1 (64%), a pesar de que las cargas aplicadas fueron notablemente superiores, y se observa también que el VF1 obturado (VF1-obt) funciona ligeramente mejor que los horizontales.

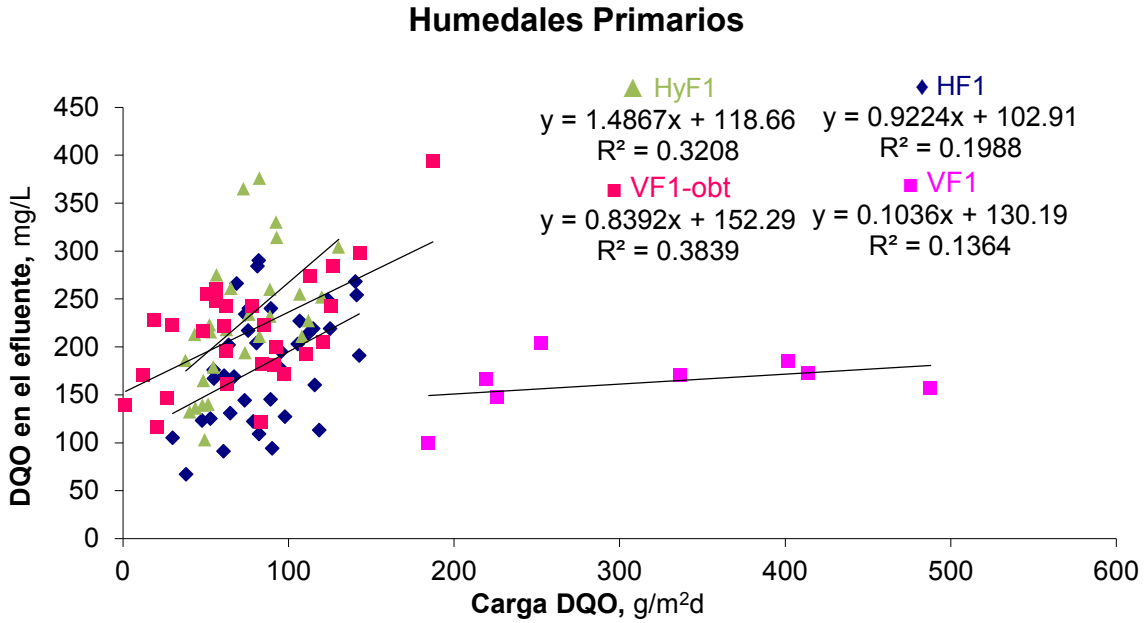


Figura 1. DQO del efluente con respecto a carga de DQO influente para los reactores primarios: HF1 (♦), HyF1 (▲), VF1 (■) y VF1-obt (■).

Resultados de los Humedales Secundarios

El efluente del Humedal Primario tanto Horizontal (HF1) como Híbrido (HyF1) fue empleado como influente de los Humedales Secundarios de picado (VFp), de grava (VFg), de picón (VFpi) y mineral (HFmin). Para poder comparar la eficiencia de remoción de los distintos reactores es necesario tener en cuenta las cargas aplicadas a cada reactor. La Tabla 3 muestra las cargas medias aplicadas y las eficiencias obtenidas por los distintos Humedales Secundarios.

La Figura 2 muestra las concentraciones de DQO del efluente de los humedales secundarios. La recta horizontal indica el valor de 125 mg/L de O_2 de la normativa. La concentración media del HFmin fue de 110 ± 37 (n: 45), la del VFg de 105 ± 29 (n: 47), del VFp de 105 ± 29 (n: 48) y el VFpi 118 ± 30 (n: 17). Como puede observarse, el VFp y el VFg dieron resultados idénticos y fueros los que dieron mejores resultados, con el valor más bajo de DQO y casi todos los valores por debajo de 125 mg/L, aunque las diferencias entre las concentraciones de los 4 reactores no son significativas.

Las eficiencias globales de remoción de DQO fueron de 82% para el HF1+VFg, de 80% para el HF1+VFp, de 79 % para el HF1+HFmin y de 79% para el HF1+VFpi.

Tabla 3. Cargas superficiales medias aplicadas (valor ± desviación estándar) y eficiencias (% de remoción) obtenidas por los Humedales Secundarios. Las unidades de la carga hidráulica (HLR) son L/m^{2}d, las de carga superficial de turbidez son NTUxL/m^{2}d, las de coliformes fecales son UFC/m^{2}d y las demás son g/m^{2}d.

Carga ± desv std *Remoción (%)*	**HFmin**	**VFg**	**VFp**	**VFpi**
HLR	**68 ± 48**	**475 ± 218**	**502 ± 235**	**150 ± 89**
DBO_5	**25 ± 47** *54*	**45 ± 35** *86*	**56 ± 51** *92*	**10 ± 10** *73*
DQO	**23 ± 25** *45*	**93 ± 51** *52*	**114 ± 71** *52*	**34 ± 27** *38*
SS	**2 ± 2** *79*	**20 ± 16** *85*	**22 ± 18** *91*	**5 ± 5** *69*
Turbidez	**3 ± 2** *89*	**24 ± 18** *91*	**25 ± 19** *96*	**9 ± 7** *82*
NH_4^+	**5 ± 5** *26*	**39 ± 19** *46*	**38 ± 19** *61*	**17 ± 10** *-3*
Fosfatos	**1 ± 1** *25*	**18 ± 10** *17*	**18 ± 10** *15*	**5 ± 2** *8*
Coliformes fecales	**1.3 (± 2.2)x10^9** *99.21*	**1.5 (± 1.7)x10^{10}** *96.79*	**1.9 (± 2.4)x10^{10}** *99.54*	**7 (± 10)x10^6** *84.55*

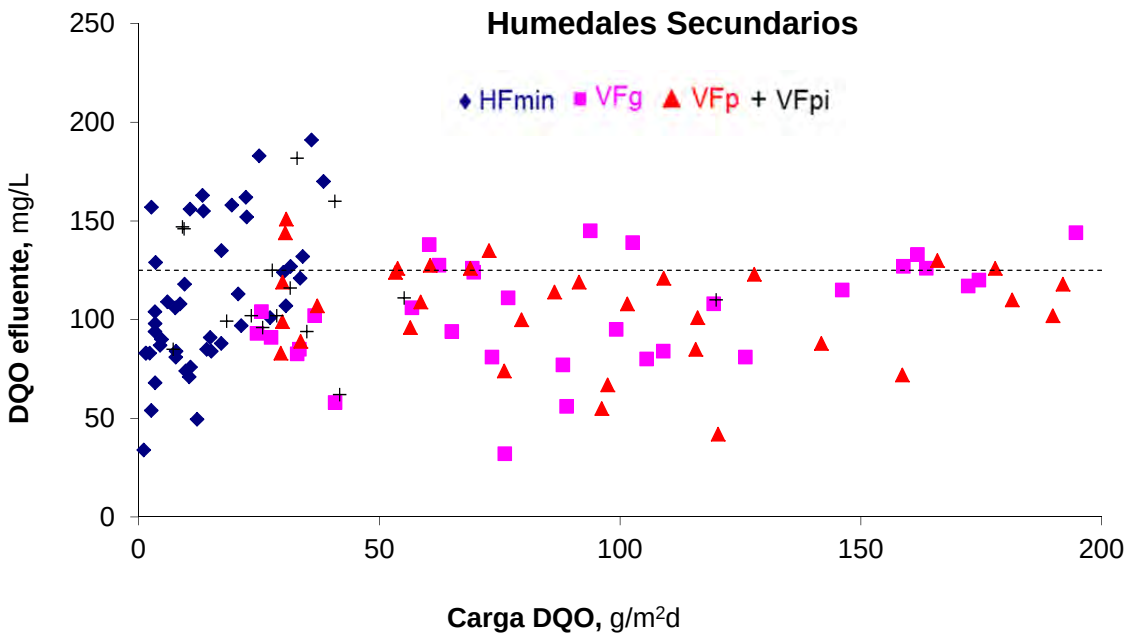


Figura 2. DQO del efluente con respecto a carga de DQO influente para los reactores secundarios: HFmin (♦), VFg (■), VFp (▲) y VFpi (+).

Efecto del régimen hidráulico

En humedales verticales se suele emplear una dosificación discontinua del reactor para alternar períodos de aireación con períodos de inundación. De esta forma se obtienen altos niveles de nitrificación, remoción de materia orgánica y bacterias (Zurita y White, 2014). Sin embargo, en trabajos anteriores (Herrera Melián et al., 2010) se obtuvieron buenos resultados aplicando una alimentación continua de los VFs. Por eso se decidió estudiar el efecto de la dosificación, continua o discontinua, en estos reactores. La Tabla 4 recoge las

cargas superficiales aplicadas a ambos reactores y las eficiencias obtenidas con cada régimen hidráulico.

Tabla 4. Cargas superficiales aplicadas a VFg y VFp, concentración del efluente y eficiencias (% de remoción) obtenidas con cada régimen hidráulico. Las unidades de carga superficial de turbidez son NTUxL/m^2d y las demás son g/m^2d. Las unidades de concentración del efluente de turbidez son UNT y las demás son mg/L.

Carga ± desv std Concentración ± desv std *Remoción (%)*	**VFg**		**VFp**	
	Continuo	Discontinuo	Continuo	Discontinuo
DBO_5	**64 ± 31** 27 ± 14 *84*	**22 ± 26** 14 ± 14 *90*	**87 ± 48** 12 ± 13 *90*	**17 ± 16** 3 ± 2 *95*
DQO	**119 ± 45** 105 ± 33 *55*	**51 ± 26** 100 ± 23 *47*	**137 ± 63** 99 ± 32 *57*	**55 ± 25** 103 ± 23 *44*
SS	**26 ± 15** 6 ± 3 *85*	**15 ± 15** 8 ± 4 *78*	**32 ± 20** 3 ± 1 *93*	**11 ± 10** 4 ± 2 *87*
Turbidez	**27 ± 16** 4 ± 2 *95*	**21 ± 21** 6 ± 3 *87*	**32 ± 21** 1 ± 0 *97*	**17 ± 14** 2 ± 1 *94*
NH_4^+	**39 ± 16** 35 ± 22 *53*	**38 ± 24** 64 ± 28 *33*	**43 ± 21** 20 ± 17 *73*	**30 ± 13** 55 ± 25 *41*

CONCLUSIONES

Del presente trabajo se pueden extraer varias conclusiones de la comparación entre los diferentes reactores y configuraciones estudiados.

Humedales primarios

En el comportamiento de los humedales primarios, según lo que se desprende del tratamiento estadístico de los datos, sólo existen diferencias significativas ($p<0.05$) en la DBO y en turbidez. En DBO, se consiguió una mejor eficiencia de eliminación en el HyF1 y VF1-obt que en el HF1, mientras que en turbidez se obtuvieron datos mejores de eficiencia en el HF1 y HyF1 que en el VF1-obt. La principal conclusión que se puede obtener de estos trabajos es que un humedal vertical funciona claramente mejor que uno horizontal o híbrido a pesar de aplicarle cargas muy superiores. Si llegara a obturarse el humedal vertical seguiría funcionando con la misma eficiencia que uno horizontal o híbrido.

Humedales secundarios

Teniendo en cuenta todos los aspectos anteriores, se puede concluir que el picado usado como sustrato de humedales para el tratamiento de aguas residuales es tan válido o más que la grava, sustrato convencional y que no tiene las ventajas medioambientales que presenta el picado y que se expusieron ya en la introducción del documento.

REFERENCIAS

Aslam, M. M. (2007). *Treatment performances of compost-based and gravel-based vertical flow wetlands operated identically for refinery wastewater treatment in Pakistan.* Ecological Engineering 30: 34-42.

Herrera, J. A., Martín, A. J., Araña, J., González, O. y González, J. J. (2010). *Hybrid constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in the Canary Islands.* Ecological Engineering 36: 891-899.

Knight, R. L. y Kadlec, R. H. (1996). *Treatment wetlands. Boca Ratón*. Lewis Publishers.

Knowles, P., Dotro, G., Nivala , J. y García , J. (2011). *Clogging in subsurface-flow treatment wetlands: Occurrence and contributing factors.* Ecological Engineering 37: 99-112.

Proyecto DEPURANAT. (2006). *Gestión Sostenible del Agua Residual en Entornos Rurales. Tenerife.* Instituto Tecnológico de Canarias, S.A.

Saeed, T. y Sun , G. (2011). *A comparative study on the removal of nutrients and organic matter in wetland reactors employing organic media.* Chemical Engineering Journal 171: 439-447.

Tee, H. C., Seng, C. E., Noor, A. M. y Lim, P. E. (2009). *Performance comparison of constructed wetlands with gravel- and rice husk-based media for phenol and nitrogen removal.* Science of the Total Environment 407: 3563-3571.

Zurita, F. y White, J. R. (2014). *Comparative Study of Three Two-Stage Hybrid Ecological Wastewater Treatment Systems for Producing High Nutrient, Reclaimed Water for Irrigation Reuse in Developing Countries.* Water 6: 213-228.

ISBN: 978-84-938046-4-0

APORTACIONES DE LA NANOTECNOLOGÍA A LOS TRATAMIENTOS DEL AGUA. CASOS PRÁCTICOS PARA CANARIAS.

Jessica CASTELLANO VERA[1], Jennifer VASWANI REBOSO[2], Baltasar PEÑATE SUÁREZ[3]

[1] Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. jessica_cv_1992@hotmail.com
[2] Grupo CAFMA. Departamento de Ingeniería de Procesos. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. jvaswani@cafma.gi.ulpgc.es
[3] Departamento de Agua del Instituto Tecnológico de Canarias. Playa de Pozo Izquierdo s/n. Santa Lucía – Gran Canaria 35119. baltasarp@itccanarias.org

RESUMEN

Este trabajo evalúa los nanomateriales prometedores para mejorar los sistemas de tratamiento de aguas en Canarias. En concreto, analiza aquéllos que pueden ser útiles para el tratamiento de los fluoruros, la reducción del scaling/fouling en las membranas y los nanomateriales luminiscentes que permitan una detección temprana de determinados contaminantes presentes en el agua. En el caso del flúor, las nanopartículas de magnetita son las más prometedoras. Combinadas con el hidróxido de aluminio presentan altas capacidades de adsorción (88,48 mg F^-/g de adsorbente) y un precio relativamente bajo en comparación con otros nanomateriales. Por otra parte, las nanopartículas de dióxido de titanio se convierten en el nanomaterial con mayor potencial para reducir el bio-ensuciamiento de las membranas de ósmosis inversa. Finalmente, para la detección temprana, los nanomateriales luminiscentes mejoran el límite de detección, permitiendo detectar diferentes compuestos presentes en el agua, como hidrocarburos aromáticos policíclicos o determinados metales pesados, aún cuando éstos están en muy bajas concentraciones.

Palabras claves: *agua, nanomateriales, fluoruros, scaling/fouling, detección temprana.*

ABSTRACT

Promising nanomaterials to improve water treatment systems in the Canary Islands are evaluated in this paper. Specifically, it analyses which nanomaterials can be useful for the treatment of fluorides or reduce scaling/fouling of membranes and luminescent nanomaterials that allow an early detection of certain pollutants in the water. For fluorine, the magnetite nanoparticles are the most promising. Combined with aluminum hydroxide have high adsorption capacities (88.48 mg F^-/g of adsorbent) and a low price compared to other nanomaterials. Moreover, the titanium dioxide nanoparticles are the nanomaterials with greater potential to reduce biofouling of reverse osmosis membranes. Finally, for the early detection, the luminescent nanomaterials improve the limit of detection, thanks to that it allows the detection of different compounds present in water, such as polycyclic aromatic hydrocarbons or certain heavy metals, even though they are in very low concentrations.

Key words: *water, nanomaterials, fluorides, scaling/fouling, early detection.*

INTRODUCCIÓN

Los nanomateriales son elementos con propiedades morfológicas más pequeñas que un micrómetro en al menos una dimensión. Al manipular la materia a una escala tan minúscula de átomos y moléculas ésta demuestra fenómenos y propiedades totalmente nuevas. A lo largo de los últimos años las inversiones en las actividades de I+D dedicadas a promocionar la nanociencia y la nanotecnología han ido creciendo más y más, y es una opinión bastante extendida entre los expertos que será la tecnología dominante durante las próximas décadas. En base a esto, se analiza el uso de los nanomateriales para el tratamiento del agua como una alternativa que permita dar solución a los inconvenientes de los métodos tradicionalmente usados. El trabajo se centra en tres casos que pueden ser de gran interés para Canarias, donde el agua es un recurso natural indispensable para el desarrollo socioeconómico de las islas.

En las aguas de Canarias de origen natural los fluoruros son considerados uno de los parámetros con mayor problemática. En una evaluación realizada por la Universidad de la Laguna y el Instituto Tecnológico de Canarias (2010) se muestra que los fluoruros constituyen el problema prioritario de calidad de las aguas del archipiélago. A nivel mundial el grado de I+D para el tratamiento de los fluoruros se encuentra a las puertas de la comercialización; sin embargo, en Canarias, todavía no se ha desarrollado ningún prototipo que permita un tratamiento específico de los mismos. Debido a ello se avalúa qué nanomateriales pueden ser prometedores para retirar los fluoruros de las aguas de Canarias. También se analizan aquellos que permitan disminuir los principales problemas de las membranas de ósmosis inversa: el scaling y el fouling, teniendo en cuenta que la máxima capacidad de desalación en Canarias se obtiene a partir de este tipo de tecnología. Finalmente se estudia la detección temprana de determinados contaminantes del agua en base a nanomateriales luminiscentes. Este estudio ha sido elegido no solo por su aplicabilidad en Canarias, sino también por la necesidad general de buscar nuevos métodos que sirvan de alternativa a las técnicas convencionalmente utilizadas y permitan una detección rápida y sencilla, sin necesidad de análisis específicos.

NANOMATERIALES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA

La nanotecnología está encontrando aplicaciones en el tratamiento del agua de tres formas posibles: 1) Uso de las nanopartículas para adsorber los contaminantes. Gracias a su gran área superficial los nanomateriales permiten retener una mayor tasa de contaminantes que los adsorbentes convencionales; 2) Uso de membranas con nanomateriales. Diversos estudios han fijado nanomateriales a distintas membranas poliméricas y han obtenido un mayor flujo de agua que las membranas convencionales; 3) Uso de nanopartículas catalíticas para descomponer los contaminantes. Los nanomateriales presentan una mayor fotoactividad que los catalizadores convencionales.

Los nanomateriales como las nanopartículas de plata (Ahmed et al.,2013), las nanopartículas de TiO_2 y los nanotubos de carbono (Li et al., 2008) tienen efectos bactericidas que permiten acabar con aquellos microorganismos presentes en las aguas. También presentan mejores capacidades de adsorción que los adsorbentes convencionales para bajas concentraciones de metales pesados: nanomateriales porosos de carbono han sido utilizados de manera eficiente para la eliminación de plomo, cadmio, níquel y zinc (Ruparelia et al., 2008). Otra aplicación es el tratamiento de los aceites y disolventes orgánicos presentes en las aguas: nanopartículas de SiO_2 fijadas a una membrana de polisulfona mejoran las propiedades antiincrustantes y aumentan la permeabilidad de 1,08 a 17,32 $l/m^2 \cdot h$ (Ahmad et al., 2011). Por otra parte, nanoláminas de nitruro de boro han mostrado que adsorben hasta 33 veces su propio peso en aceites y disolventes orgánicos a

la vez que repelen el agua (Lei et al., 2013). También se ha evaluado la utilización de nanomateriales para el tratamiento de los contaminantes emergentes presentes en las aguas: una combinación de nanotubos de dióxido de titanio sobre una base de grafeno elimina, con la ayuda del sol, restos de fármacos y pesticidas que escapan de los sistemas actuales de depuración (Marina, 2014).

TRATAMIENTO DEL FLÚOR

El flúor es un elemento indispensable para la salud dental, ya que en forma de iones fluoruro o combinado con otros compuestos se emplea con fines terapéuticos y profilácticos, de los que el más importante es la prevención de la caries dental. Sin embargo, la ingesta de flúor en altas concentraciones puede dar lugar al desarrollo de alteraciones óseas y dentales, englobadas bajo el término de fluorosis. La ingesta de flúor se produce, mayoritariamente, debido a la presencia del mismo en las aguas de consumo y, por lo tanto, son los contenidos en el agua de abastecimiento público los que deben ser sometidos a un control más exhaustivo (Martín y Fernández, 1992).

Tabla 1. Comparación de adsorbentes del flúor.

Adsorbente		Capacidad de adsorción (mg/g)	pH	Precio[(2)] (€/g)	Referencia
Tamaño convencional	**Alúmina activada**	3,86 - 5	6,0	0,06[(3)]	(Venkobache y Iyengar, 1998)
	Óxido de magnesio	7	n/a[(1)]	0,40[(3)]	(Valenzuela et al., 2011)
	Óxido férrico hidratado	16,5	5,0	2,30	(Dey et al., 2004)
Tamaño nano	**Nano-hidroxiapatita**	0,0702-6,161	5,0	7,00[(3)]	(Sairam et al., 2008)
	ACNTs	4,1	7,0	50,00	(Li et al., 2003)
	MgO-nano Fe_3O_4	10,96	5,0-7,0	2,00[(3)]	(Minju et al., 2013)
	Nano-MgO	14,0	10,0-11,0	16,34	(Devi et al., 2012)
	PPy/Fe_3O_4	17,6-22,3	6,5	2,00[(3)]	(Bhaumika et al., 2011)
	Al_2O_3/CNTs	28,7	6,0	50,00[(3)]	(Li et al., 2001)
	Nanopartículas magnéticas de Fe_3O_4@Al(OH)$_3$	88,48	6,5	2,00[(3)]	(Zhao et al., 2010)

ACNTs: nanotubos de carbono alineados, PPy: polipirrol, Fe_3O_4: $Fe^{2+}(Fe^{3+})_2O_4$, CNTs: nanotubos de carbono

(1) Not avaliable (no disponible).
(2) Según la empresa Sigma Aldrich.
(3) Precio estimado basado en la empresa Sigma Aldrich.

Las tecnologías actualmente utilizadas para la eliminación de flúor de las aguas pueden agruparse en la utilización de membranas, intercambio iónico, coagulación-precipitación y técnicas basadas en fenómenos de adsorción. Sin embargo, todavía en la actualidad, estas técnicas no son fáciles de implementar, ni son baratas, ni están libres de un impacto medioambiental residual (Universidad de La Laguna e Instituto Tecnológico de Canarias, 2010). Por ello, en la Tabla 1 se recogen los nanomateriales más prometedores para este

fin, y se comparan sus propiedades con las de los adsorbentes de flúor tradicionalmente utilizados.

Entre todos los nanomateriales estudiados los más prometedores son las nanopartículas de magnetita. Combinadas con el hidróxido de aluminio podrían ser el adsorbente perfecto para terminar con los problemas de flúor en las aguas. Sus principales ventajas se deben a las altas capacidades de adsorción (88,48 mg F^-/g de adsorbente) y su precio relativamente bajo en comparación con los otros nanomateriales. El fluoruro es adsorbido en la superficie del óxido de aluminio hidratado de carga opuesta por la fuerte fuerza electrostática y una probable reacción química que se produce en la superficie (Zhao et al., 2010):

$$[Al(OH)_3] + xF^- \rightarrow Al(OH)_{3-x}F_x + xOH^-$$

Si esto se combina con las propiedades magnéticas de las nanopartículas de Fe_3O_4 se puede obtener un adsorbente con una gran área superficial, una alta afinidad hacia el fluoruro y una buena separabilidad magnética. Además, son eficaces a pH neutro, lo cual es importante teniendo en cuenta que el pH del agua de abastecimiento está entre 6,5 y 8,5. El único inconveniente que presentan es que la capacidad de adsorción de fluoruros disminuye en presencia de iones sulfatos y fosfatos.

Para comparar mejor los distintos tipos de nanomateriales se muestra la Tabla 2. Si se considera una concentración de flúor inicial en el agua a tratar de 5 mg/L y tenemos en cuenta la capacidad de adsorción de cada nanomaterial mostradas en la Tabla 1, podemos calcular la cantidad necesaria y el precio para tratar 1 m^3 de agua. Se considera que será necesario adsorber alrededor de 4 mg/L para que el agua tratada esté dentro de los límites admisibles (0,7 – 1,5 mg F/L).

Tabla 2. Cantidad necesaria y precio de cada adsorbente para tratar 1 m3 de agua con una concentración de 5 mg F/L.

Adsorbente		Cantidad necesaria* (g/m^3)	Precio (€/m^3)
Tamaño convencional	**Alúmina activada**	902,93	54,18
	Óxido de magnesio	571,43	228,57
	Óxido férrico hidratado	242,42	557,57
Tamaño nano	**Nano-hidroxiapatita**	1284,11	8988,77
	ACNTs	975,61	48780,50
	MgO-nano Fe_3O_4	364,96	729,92
	Nano-MgO	285,71	4668,5
	PPy/Fe_3O_4	200,50	401
	Al_2O_3/CNTs	139,37	6968,5
	Nanopartículas magnéticas de Fe_3O_4@$Al(OH)_3$	45,21	90,42

* Para adsorber 4 mg F/L.

Como se observa en la Tabla 2, económicamente seguiría siendo más viable utilizar la alúmina activada, no obstante el desarrollo de la nanotecnología puede permitir abaratar los costes y convertir a las nanopartículas de Fe_3O_4@$Al(OH)_3$ en un adsorbente con un gran potencial. Se podría pensar en la utilización de un depósito separado en dos partes. En la parte superior estará el adsorbente en forma de polvo en contacto con el agua a tratar y un agitador que favorezca el proceso, y en la parte inferior un campo magnético que atrae las

nanopartículas. De esta manera se evita que el agua tratada pueda llegar a tener restos del adsorbente utilizado. Para regenerar el adsorbente, cada cierto tiempo el depósito libre de agua se lavaría con soluciones de concentraciones adecuadas de NaOH y HCl que retirarían los iones fluoruro y activarían de nuevo la superficie del adsorbente.

SCALING Y FOULING EN LAS MEMBRANAS DE ÓSMOSIS INVERSA

La ósmosis inversa es, actualmente, una de las tecnologías de desalación más extendidas, sin embargo, el ensuciamiento de las membranas es todavía considerado como uno de los principales retos para conseguir una operación eficiente. Se pueden diferenciar dos fenómenos de ensuciamiento: el scaling (ensuciamiento cristalino) y el fouling (ensuciamiento coloidal).

Tradicionalmente, para hacer frente al fouling, se recurre a la adecuación del agua de alimentación mediante pretratamientos de coagulación-floculación, filtración o de desinfección. Para prevenir o retardar el scaling, se recurre, entre otros, a pretratamientos mediante la dosificación de ácido, la precipitación o la adición de determinados inhibidores. Pero en la superficie de las membranas los procesos de ensuciamiento son muy complicados y están influidos por muchos factores. Además, los productos anti-scaling, en ocasiones, pueden incrementar la probabilidad de bio-fouling (tipo especial de ensuciamiento provocado, principalmente, por microorganismos y sustancias orgánicas), al aportar al agua nutrientes empleados en su formulación.

Diversos estudios han reportado que las nanopartículas de $CaCO_3$ (Nair et al., 2013), nanopartículas de MnO_2 hidratado (Gohari et al., 2014), nanopartículas de TiO_2 (Vatanpour et al., 2012) y nanopartículas de plata (Li et al., 2013) tienen propiedades anti-fouling. En cuanto al scaling, las investigaciones son menores; no obstante, se ha mostrado que las nanopartículas de penta-calcio-dietilentriamina (metilenfosfonato): nano-CA-DTPMP presentan una mayor influencia en la inhibición de la calcita que la solución DTPMP comercial a micro escala (Kiaei y Haghtalab, 2014).

Tabla 3. Resultados obtenidos de los estudios de rendimiento anti-fouling de diferentes nanomateriales con la proteína BSA.

Nanomaterial	Membrana	% en peso de nanomaterial	FFR (%)	Referencia
Nanopartículas-$CaCO_3$	Polisulfona	10	71	(Nair et al., 2013)
Nanopartículas-MnO_2 hidratado	Polietersulfona	13,04	64,3	(Gohari et al., 2014)
Nanopartículas-MnO_2 hidratado	PVDF/SPES	4	86,2	(Rahimpour et al., 2011)
Nano-TiO_2	Polietersulfona	4	90,8	(Vatanpour et al, 2012)
Nano-Ag	PVDF	1,5	74	(Li et al., 2013)

PVDF: poli (fluoruro de vinilideno), SPES: polietersulfona sulfonada.

Para estudiar las propiedades anti-fouling de estos nanomateriales se utiliza, en la mayoría de los estudios, la proteína de albúmina de suero bovino (BSA) como modelo. El procedimiento consiste en calcular inicialmente el flujo de agua pura de la membrana que contiene el nanomaterial J_{W1} (L/m^2 h) y calcular posteriormente el flujo J_{W2} (L/m^2 h) después de haber filtrado una solución de BSA. La propiedad anti-fouling de la membrana se evalúa

mediante el cálculo de la relación de recuperación del flujo (FRR) usando la siguiente ecuación:

$$FRR(\%) = \frac{J_{W2}}{J_{W1}} \cdot 100$$

En general, el aumento del FRR indica una mejor propiedad antiincrustante de la membrana.

De la Tabla 3 se obtiene que los nanomateriales más prometedores son las nanopartículas de plata y de dióxido de titanio (TiO_2). El principal mecanismo de la actividad antibiofouling de las nanopartículas de TiO_2 es la mejora de la hidrofilicidad de la membrana mediante la introducción de grupos hidrófilos -OH sobre la superficie de la misma. Esto produce interacciones más altas entre el TiO_2 y las moléculas de agua y permite formar una capa delgada de agua en la superficie de la membrana que puede actuar como una barrera contra la adsorción de proteínas sobre la membrana (Vatanpour et al., 2012). En el caso de las nanopartículas de plata, éstas mejoran también la hidrofillicidad de las membranas y gracias a su efecto bactericida resisten eficazmente el crecimiento de microorganismos, sin embargo el precio de este nanomaterial es algo mayor.

DETECCIÓN TEMPRANA MEDIANTE NANOMATERIALES LUMINISCENTES

Se estudian aquellos nanomateriales luminiscentes que podrían ser útiles para una detección rápida y temprana de determinados contaminantes en el agua, siendo de gran interés para aquellas sustancias prioritarias establecidas en el Anexo X (como los hidrocarburos aromáticos policíclicos, el plomo y el mercurio) de la Directiva 2013/39/UE del Parlamento Europeo y del Consejo. Y es que existen sustancias que independientemente de la concentración en la que se encuentre en el agua, un rápido aviso de su presencia puede remediar importantes problemas.

Los nanomateriales luminiscentes que más se aplican son los puntos cuánticos de tipo semiconductor. La luminiscencia de los puntos cuánticos es muy sensible a sus estados de superficie. Por lo tanto, es razonable esperar que interacciones químicas o físicas entre un producto químico determinado y la superficie de las nanopartículas se traduzcan en cambios en las cargas de la superficie de los puntos cuánticos y afecten a la emisión de fotoluminiscencia de éstos muy significativamente. En la mayoría de los casos, los puntos cuánticos se conjugan con algunas sustancias especiales para capturar los contaminantes de interés y a través del análisis del cambio de intensidad y longitud de onda de fluorescencia se puede realizar la detección de contaminantes. Este análisis se puede basar en el efecto de activación de la luminiscencia o en el uso del efecto de *quenching* de un analito en la emisión de luminiscencia de una nanopartícula. El fenómeno de *quenching* se refiere a procesos que provocan una disminución de la intensidad de fluorescencia de una sustancia dada.

En la Tabla 4 se muestran los límites de detección establecidos por algunos de los estudios analizados y se puede observar que los nanomateriales permiten la detección de diferentes compuestos presentes en el agua aún cuando éstos están en muy bajas concentraciones.

CONCLUSIONES

Las nanopartículas Fe_3O_4@$Al(OH)_3$ se convierten en un adsorbente con una gran área superficial, una alta afinidad hacia el fluoruro y una buena separabilidad magnética. Por su

parte, las nanopartículas de TiO_2 proporcionan propiedades anti-fouling al aumentar la hidrofilia de la membrana, y propiedades anti-biofouling al producir radicales hidroxilo libres e iones superóxido por recibir la energía de luz UV. En cuanto a los nanomateriales luminiscentes, sus propiedades físicas y químicas únicas tienen un enorme potencial para el diseño de dispositivos de detección de contaminantes en el agua.

Tabla 4. Límite de detección de determinados elementos utilizando diferentes nanomateriales luminiscentes.

Nanomaterial	Contaminante	Límite de detección (LOD)	Referencia
QDs de CdTe-NTs de TiO	BaP (PAHs)	$15 \cdot 10^{-12}$ M	(Yiang et al., 2010)
QDs-AChe-ACh	Paratión metílico (Pesticidas)	$17 \cdot 10^{-8}$ M	(Kim et al., 2012)
QDs de Grafeno	Cloro libre	$50 \cdot 10^{-9}$ M	(Dong, 2012)
QDs de ZnS-NAC	Mercurio	$50 \cdot 10^{-10}$ M	(Duan et al., 2011)
QDs de ZnSe-MAA	Cobre	$47 \cdot 10^{-8}$ M	(Wu, 2014)

QDs: Quantum Dots (puntos cuánticos), BaP: benzo(a)pireno, PAHs: hidrocarburos aromáticos policíclicos, AChe: acetilcolinesterasa, ACh: acetilcolina, NAC: N-acetil-L-cisteína, MAA: ácido mercaptoacético.

En definitiva, la nanotecnología es, sin duda alguna, un campo lleno de posibilidades, y de ahí la necesidad de abrir nuevas líneas de I+D para el desarrollo de prototipos y productos que, por ejemplo, permitan un tratamiento selectivo de los fluoruros en las aguas de Canarias en base a los nanomateriales aquí analizados. De esta manera, este trabajo pretende ser la llave para investigaciones futuras que conduzcan a productos innovadores que exploten los beneficios de los nanomateriales en el tratamiento de las aguas.

REFERENCIAS

Ahmad, A. L.; Majid, M. A., y Ooi, B. S. (2011). Functionalized PSf/SiO2 nanocomposite membrane for oil-in-water emulsion separation. Desalination 268: 266-269.

Ahmed, T.; Imdad, S.; Yaldram, K.; Mohammad Butt, N. y Pervez, A. (2013). *Emerging nanotechnology-based methods for water purification: a review*. Desalination and Water Treatment: 1-13.

Bhaumika, M.; Leswifia, T. Y.; Maity, A.; Srinivasu, V. V. y Onyango, M. S. (2011). *Removal of fluoride from aqueous solution by polupyrrole/Fe3O4 magnetic nanocomposite*. Journal of Hazardous Materials 186: 150-159.

Devi, R. R.; Umlong, I. M.; Raul, P. K.; Das, B.; Banerjee, S. y Singh, L. (2012). *Defluoridation of water using nano-magnesium oxide*. Journal of Experimental Nanoscience 9 (5): 512-524.

Dey, S.; Goswami, S. y Ghosh, U. C. (2004). *Hydrous ferric oxide (HFO) - a scavenger for fluoride from contaminated water*. Water, Air, and Soil Pollution: 311-323.

Dong, Y. (2012). *Graphene Quantum Dot as a Green and Facile Sensor for Free Chlorine in Drinking Water.* Analytical Chemistry 84: 8378−8382.

Duan, J.; Jiang, X.; Ni, S.; Yang, M. y Zhan, J. (2011). *Facile synthesis of N-acetyl-l-cysteine capped ZnS quantum dots as an eco-friendly fluorescence sensor for Hg2+*. Talanta 85: 1738-1743.

Gohari, R. J.; Halakoo, E.; Nazri, N. A.; Lau, W. J.; Matsuura, T. y Ismail, A. F. (2014). I*mproving performance and antifouling capability of PES UF membranes via blending with highly hydrophilic hydrous manganese dioxide nanoparticles*. Desalination 335: 87-95.

Kim, T.; Tran, C.; Chinh, D.; Dieu, T.; Yen, H.; Hai, N.; Cao, T.; Nga, T. y Liem, Q. (2012). *Fabrication of fluorescence-based biosensors from functionalized CdSe and CdTe quantum dots for pesticide detection*. ADVANCES IN NATURAL SCIENCES: NANOSCIENCE AND NANOTECHNOLOGY 3: 4 pp.

Lei, W.; Portehault, D.; Liu, D.; Qin, S. y Chen, Y. (2013). *Porous boron nitride nanosheets for effective water cleaning.* Nature Communications .

Li, Q.; Mahendra, S.; Lyon, D. Y.; Brunet, L.; Liga, M. V.; Li, D. y otros. (2008). *Antimicrobial nanomaterials for water disinfection and microbial control: Potential applications and implications*. Water Research 42: 4591-4602.

Li, X.; Pang, R.; Li, J.; Sun, X.; Shen, J.; Han, W. et al. (2013). *In situ formation of Ag nanoparticles in PVDF ultrafiltration membrane to mitigate organic and bacterial fouling.* Desalination 324: 48-56.

Li, Y.-H.; Wang, S.; Cao, A.; Zhao, D.; Zhang, X.; Xu, C. et al. (2001). *Adsorption of fluoride from water by amorphoues alumina supported on carbon nanotubes*. Chemical Physics Letters 350: 412-416.

Li, Y.-H.; Wang, S.; Zhang, X.; Wei, J.; Xu, C.; Luan, Z. et al. (2003). *Adsorption of fluoride from water by aligned carbon nanotubes.* Materials Research Bulletin 38: 469-476.

Marina, R. (2014). *Nanomateriales para depurar el agua con luz solar*. EFE: FUTURO .

Martín , M., y Fernández, C. (1992). *Contenido en Flúor de las aguas de abastecimiento público.* Dirección General de Salud Pública. Servicio Canario de Salud.

Minju, N.; Swaroop, K. V.; Haribabu, K.; Sivasubramanian, V. y Kumar, P. S. (2013). *Removal of fluoride from aqueous media by magnesium oxide-coated nanoparticles*. Desalination and Water Treatment: 1-10.

Nair, A. K.; Isloor, A. M.; Kumar, R. y Ismail, A. F. (2013). *Antifouling and performance enhancement of polysulfone ultrafiltration membranes using CaCO3 nanoparticles.* Desalination 322: 69-75.

Rahimpour, A.; Jahanshahi, M.; Rajaeian, B. y Rahimnejad, M. (2011). *TiO2 entrapped nano-composite PVDF/SPES membranes: Preparation, characterization, antifouling and antibacterial properties.* Desalination 278: 343–353.

Ruparelia, J. P.; Duttagupta, S. P.; Chatterjee, A. K. y Mukherji, S. (2008). *Potential of carbon nanomaterials for removal of heavy metals from water.* Desalination 232: 145-156.

Sairam Sundaram, C.; Viswanathan, N. y Meenakshi, S. (2008). *Uptake of fluoride by nano-hydroxyapatite/chitosan, a bioinorganic composite.* Bioresource Technology 99: 8226-8230.

Universidad de La Laguna e Instituto Tecnológico de Canarias (2010). *Evaluación de tecnologías potenciales de reducción de la contaminación de las aguas de Canarias*. Proyecto Tecnoagua. Informe final.

Valenzuela, L.; Ramírez-Hernández, J.; Sol, J. A. y Reyes, J. A. (2011). *Alternativas para la Eliminación Doméstica de Flúor en el agua de Consumo Humano*. Información Tecnológica 22 (2): 23-32.

Vatanpour, V.; Madaeni, S. S.; Khataee, A. R.; Salehi, E.; Zinadini, S. y Monfared, H. A. (2012). *TiO2 embedded mixed matrix PES nanocomposite membranes: Influence of different sizes and types of nanoparticles on antifouling and performance*. Desalination 292: 19-29.

Venkobache, C. y Iyengar, L. (1998). *Defluoridation of water using activated alumina – a report.* UNICEF Project No. CE/UNICEF/9132.

Wu, D. (2014). *ZnSe quantum dots based fluorescence sensors for Cu2+ions.* Sensors and Actuators A: Physical 205: 72– 78.

Yiang, L.; Chen, B.; Luo, S.; Li, J.; Liu, R. y Cai, Q. (2010). S*ensitive Detection of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Using CdTe Quantum Dot-Modified TiO2 Nanotube Array through Fluorescence Resonance Energy Transfer.* Environmental Science & Technology 44: 7884-7889.

Zhao, X.; Wang, J.; Wu, F.; Wang, T.; Cai, Y.; Shi, Y. et al. (2010). *Removal of fluoride from aqueous media by Fe3O4@Al(OH)3 magnetic nanoparticles.* Journal of Hazardous Materials 173: 102-109.

ISBN: 978-84-938046-4-0

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO Y QUÍMICO DEL PICÓN COMO MATERIAL PARA LA DEPURACIÓN NATURAL DEL ESTIÉRCOL LÍQUIDO DE RUMIANTES

Nereida FALCÓN CARDONA[1], Vanessa MENDOZA-GRIMÓN[1], Juan Ramón FERNÁNDEZ VERA[2], Idaira HERNÁNDEZ BRITO[2], Axel RITTER[3], José Manuel HERNÁNDEZ-MORENO[4] María del Pino PALACIOS-DÍAZ[1]

[1] Departamento de Patología Animal, Producción Animal y Ciencia y Tecnología de los Alimentos, Grupo GEOVOL Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 35413 Las Palmas de Gran Canaria, España, mp.palaciosdiaz@ulpgc.es
[2] Laboratorio agroalimentario y fitopatológico del Cabildo de Gran Canaria, Arucas, España, jrfernandezv@grancanaria.com
[3] Departamento de ingeniería Agroforestal, aritter@ull.es
[4] Departamento de Biología Animal, Edafología y Geología, jhmoreno@ull.es

RESUMEN

Los efluentes ganaderos constituyen un beneficioso aporte de nutrientes para los cultivos, que es fundamental a la hora de garantizar la sostenibilidad de la gestión de las explotaciones ganaderas, pudiendo ocasionar graves problemas ambientales si se emplean mal. La intensificación agraria ha convertido los efluentes ganaderos de subproducto a residuo. Su tratamiento con materiales locales y tecnologías de baja intensidad es una solución de bajo coste financiero y energético. En el proyecto REAGUA se plantea la posibilidad de utilizar el "picón" (lapilli) como material para el tratamiento del estiércol líquido de rumiantes, para su posterior empleo en el riego enterrado de especies forrajeras y biocombustibles, actuando el suelo como medio de depuración avanzado. Para ello, se diseña un sistema en el que se aporte el efluente con un flujo subsuperficial vertical en un medio no saturado, que circule por tres fases (en serie). Para determinar las condiciones de manejo que optimicen el filtrado se caracterizó el comportamiento hidráulico del picón y su capacidad de eliminar sustancias. Utilizando tres columnas rellenas de picón y un efluente de rumiantes, las reducciones de la DQO, DBO_5 y amonio, fósforo y SS superaron el 80, 90% y 95% respectivamente, obteniéndose valores asumibles para inyectarse al riego.

Palabras clave: *lapilli, estiércol líquido, depuración avanzada, picón y especies forrajeras.*

ABSTRACT

Livestock effluents constitute a beneficial nutrient supply for crops which is critical to ensuring the sustainability of the farms management. However, they can cause serious environmental problems if misused. The progressive agriculture intensification has transformed the consideration of byproduct into effluent waste. Treatment with local materials and low technology intensity is a low-cost solution in terms of finance and energy. The REAGUA project analyzes the possibility to use the "picon" (lapilli) as material for the treatment of liquid manure from ruminants, for later use in subsurface drip irrigation system to produce forage and biofuels, in which the soil acts as subsequent advanced treatment. A

system in which the effluent is poured with a vertical subsurface flow in an unsaturated medium, which circulates through three phases, is designed. To determine the management conditions that optimize the filter it was necessary to characterize the hydraulic behavior of lapilli and its ability to remove substances. Using three lapilli-filled columns, unsaturated flux and a ruminant effluent, the reduction of DQO, DBO_5 and ammonia, phosphorus and SS obtained was over 80, 90% and 95% respectively, assumable values for irrigation.

Key words: *lapilli, slurry, advanced treatment, and forage species.*

INTRODUCCIÓN

La ganadería intensiva bovina en Canarias representa el 61% del total de la ganadería de la ganadería total y genera efluentes que deben ser almacenados en las granjas y tratados convenientemente. Éstos constituyen un beneficioso aporte de nutrientes para los cultivos que es fundamental a la hora de garantizar la sostenibilidad de la gestión de las explotaciones ganaderas. Sin embargo, si se emplean de forma inadecuada, pueden ocasionar graves problemas ambientales. En este sentido, la intensificación agraria ha ocasionado que el efluente ganadero pase de ser subproducto a ser considerado un residuo. El tratamiento del estiércol líquido con materiales locales y tecnologías de baja intensidad es una solución de bajo coste financiero y energético. En el proyecto REAGUA se plantea la posibilidad de utilizar el "picón" (lapilli) como material para el tratamiento de los efluentes ganaderos. El objetivo es que efluente producido se emplee en un sistema de riego localizado, para lo que en el tratamiento deben reducirse fundamentalmente los sólidos en suspensión (SS), la DQO, y la DBO_5, siguiendo las recomendaciones de Pescod (1992) y Ayars et al (2007). Estudios de otros autores (Abreu-Acosta y Vera, 2011), que utilizaron un sistema de tratamiento en el que una de sus fases estaba rellena de picón y en la que aplicaban un flujo subsuperficial horizontal, encontraron una buena reducción de la materia orgánica (MO), los SS y los patógenos pero también, cierto riesgo de transmisión de Salmonella. Por tanto, la mejora en la seguridad sanitaria que permite el riego con SDI resulta imprescindible. En este sentido, en el sistema propuesto en este artículo el suelo actúa como medio de depuración avanzado por lo que el efluente se aplica utilizando un sistema de riego enterrado (SDI) para producir especies forrajeras y biocombustibles. Respecto a las condiciones de tratamiento, Zurita y White (2014) comparan en un interesante estudio, la eficiencia de diversos sistemas de tratamiento no convencionales de aguas residuales, que fueron diseñados para mejorar la calidad del agua para el riego pero sin producir una reducción significativa de los nutrientes aportados (los objetivos coinciden con los del proyecto REAGUA). Estos autores concluyen que el tratamiento más eficaz es el que utiliza flujo subsuperficial vertical en dos fases (mejor que el de flujo horizontal), en el que la reducción del amonio es del 85% (que estos autores asocian al incremento del nitrato) mientras que la reducción de E. coli es del 99,99%. Coincidiendo con estos autores para el tratamiento se ha diseñado un sistema en el que se aporte el efluente con un flujo subsuperficial vertical en un medio no saturado y que circule por tres fases (en serie).

El objetivo del presente trabajo es determinar las condiciones de manejo de un sistema de depuración natural que optimicen el filtrado y la reducción de contaminantes y permitan el riego sostenible con efluentes ganaderos, utilizando lapilli como material filtrante y tecnologías de baja intensidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Comportamiento hidráulico del picón en las columnas

Se realizó un estudio en laboratorio con tres columnas cilíndricas de cristal de 0.70 m de altura y 0,048 m de diámetro, utilizando "picón" (lapilli), tamizados con una luz de 0.002 m, y

rellenando hasta una altura de 0.55 m. Las tres columnas se dispusieron en serie de manera que se simulara un sistema de depuración de flujo vertical no saturado.

Caracterización del comportamiento hidráulico de las columnas.

Utilizando agua destilada se han determinado los siguientes parámetros: densidad aparente (d_a), coeficiente entre la masa de suelo seco (M_s) y el volumen total del suelo (V_t); densidad real (d_r), cociente entre la masa de suelo seco (M_s) y el volumen ocupado por las partículas sólidas (V_s), es decir, el volumen de suelo descontando los poros y porosidad (Ɛ) volumen ocupado por los poros, expresado normalmente como porcentaje del volumen total de suelo. Para cada una de las columnas se ha medido: i) la cantidad de agua necesaria para llegar a saturación (impidiendo el drenaje y rellenando hasta obtener una ligera película de agua libre en la superficie), ii) la cantidad de agua libre, midiendo la cantidad de agua que se pierde por drenaje a lo largo del tiempo, y iii) la cantidad de agua retenida en los poros, por diferencia entre el volumen de saturación y el perdido por drenaje. Se ha calculado el contenido volumétrico a lo largo del tiempo para cada una de las columnas. Siguiendo los siguientes intervalos de tiempo 0, 0,5, 1, 2, 3, 4, 10, 20, 30 y 40 minutos.

Caracterización del potencial depurador.

Caracterización del comportamiento de las columnas con sustancias no adsorbibles ni biodegradables.

Se realizó un estudio con Br, como ejemplo de trazador con baja capacidad de adsorción. Para ello se utilizó una solución de bromuro de 50 mg/L. La solución se bombea con una bomba peristáltica con un caudal de 1ml/min. Cuando la columna se encuentra en condiciones no saturadas, conteniendo sólo agua de retención (agua destilada) se inicia la inyección del bromuro, midiéndose la concentración de esta solución a lo largo del tiempo y en cada una de las columnas, en intervalos de tiempo de 0, 100, 120, 140, 180, 200, 240, 300 y 360 minutos (tiempo en el que se recoge prácticamente todo el bromuro). Las muestras obtenidas fueron analizadas por cromatografía iónica.

Caracterización del comportamiento de las columnas con sustancias adsorbibles.

Se realizó un estudio con fosfato, como ejemplo de sustancia con capacidad de adsorción. Utilizando una disolución de fosfato, con una concentración de 50mg/l (concentración de P de 18,93 mg/l). Al igual que en el anterior caracterización se hace uso de una bomba peristáltica con un caudal de 1ml/min. Se midió la concentración de fosfato a lo largo del tiempo en cada una de las columnas, los intervalos utilizados fueron los mismos que para el bromuro. Una vez recogidas todas las muestras en cada uno de los intervalos de tiempo se procede a la medición por espectrofotometría de emisión óptica (ICP_OES).

Caracterización del comportamiento de las columnas en el tratamiento de un efluente real

En esta fase del estudio se trabaja con estiércol líquido, procedente de una granja de vacuno intensivo. En este ensayo se utiliza un caudal discontinuo de 10 ml cada 10 min en la columna 3, sin utilizar la bomba peristáltica. Se parte de que la columna no está saturada, alcanzando el flujo constante a partir del minuto 40. A los 60 minutos se recoge la primera muestra en un tubo A hasta completar 5 ml. Posteriormente se recoge la solución en un tubo B hasta completar 5 ml siguientes, y así sucesivamente hasta que cada tubo (A y B) contenga 20 ml. El tubo A se utiliza para humedecer la columna 2, a partir del minuto 100, empezando el muestreo en el minuto 160. El tubo B se lleva al laboratorio para realizar el correspondiente análisis de amonio, fósforo, nitrógeno total y metales. Se repite el mismo

procedimiento para los intervalos de tiempo 100, 140, 180, 220, 260, 300, 340, 380, 420, 460, 500, 540, 580, 600, 640, 700, 740 minutos. El mismo procedimiento se sigue para humedecer la columna 1, empezándose a humedecer en el minuto 200, comenzando el muestreo en el minuto 260. Se respeta el mismo intervalo de tiempo que en las columnas anteriores.

Caracterización del estiércol líquido

Se realizaron análisis físico-químicos de las muestras antes de su paso por las columnas y tras su paso por cada una de las mismas, determinando pH, conductividad, nitrato, amonio, DQO, DBO5, sólidos en suspensión y contenido en fósforo total y los principales constituyentes metálicos (Na, K, Ca, Mg, B, Cu).

pH y conductividad eléctrica (CE), DQO, DBO_5 y Sólidos en suspensión (SS)

Para la determinación de estos parámetros se toman dos muestras, antes de entrar en la columna 3 y a la salida de la columna 1. Se estima la DQO a partir de la cantidad de materia orgánica total en cada una de las muestras utilizadas. Se utilizan un kit Test 0-29, Nanocolor CSB 1500. La DBO_5 se obtiene por la medición de oxígeno mediante electrodo selectivo durante 5 días. Para ello utilizaremos botellas aforadas de 300 ml, siguiendo el método estandarizado de DBO_5 (APHA-AWWA-WPCF). La determinación de estos parámetros se realiza sobre 4 muestras, a la entrada de la columna 3 (M1), a la salida de la columna 3 (M2), a la salida de la columna 2 (M3) y una última a la salida de la columna 1 (M4). Se calcula el porcentaje de reducción de la DQO como cociente entre el valor obtenido tras cada una de las columnas y el valor inicial. Se miden los SS de una muestra de estiércol líquido antes de entrar a la columna 3 y otra a la salida de la columna 1. Siguiendo los métodos estandarizados (APHA-AWWA-WPCF)

Amonio, Fósforo total y nutrientes

Con un equipo de flujo segmentado, se determina el amonio presente en el efluente inicial (antes de entrar en la columna 3), el de la salida de las columnas 3, 2 y 1 para los distintos tiempos. Las concentraciones de P presente en el efluente inicial (antes de entrar en la columna 3), a la salida de la columna 2 a lo largo del tiempo, así como la concentración a la salida de la columna 1, se analizaron por espectrofotometría de emisión óptica (ICP_OES). Para el estudio de este nutriente se utiliza un efluente ganadero otra explotación de rumiantes, y por tanto distinto del utilizado para el resto de los parámetros químicos, con un valor inicial de 33 mg/L. La determinación de Na, K, Ca, Mg, B, Cu se realiza mediante la lectura por espectrofotometría de emisión óptica (ICP_OES)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comportamiento hidráulico de las columnas

En la Tabla 1, se presentan los resultados de la medida de i) la cantidad de agua necesaria para llegar a saturación, ii) la cantidad de agua libre y iii) la cantidad de agua retenida en los poros. La d_a del picón es baja si la comparamos con otros estudios realizados con picones de Canarias cuyos valores estan entre 1,12 y 2,49 g/cm^3 con valores promedios de 1,7 g/cm^3 (Hernández Moreno et al, 2009). Los valores de d_r son también bajos, encontrando los mencionados autores valores entre 2,45 y 3,70 g/cm^3, e inferiores a la densidad real del basalto, 3,01 g/cm^3, (Johnson and Olhoeft, 1984), lo que demuestra el carácter vacuolar de los piroclastos. En cuanto a porosidad, las muestras presentan unos valores intermedios, estando las del mencionado estudio entre 18 y 57%. Donahue (1995),

considera microporos aquellos capaces de retener el agua después del drenaje. En ella entrarían todos aquellos diámetros que estén comprendidos entre 0,1 y 80 µm. Los valores de micro porosidad del lapilli son bajos si se comparan con los obtenidos para Canarias (12,33 – 35,02 %), aunque en este estudio se utilizó diferente metodología para determinarlos.

Tabla 1. Características de las columnas: volumen columna ($V_{c)}$, densidad aparente (d_a), densidad real (d_r), volumen del sólido (V_s), porosidad (P) y cantidad de agua de saturación (A_s), Agua libre (A_l) y micro porosidad (M).

Columna	Peso (gr)	Altura (cm)	V_c (dm^3)	d_a (g/cm^3)	V_s (cm^3)	d_r (g/cm^3)	P %	A_s (ml)	A_l (ml)	M %
1	1117	55	0,89	1,26	488	2,29	45	397,0	91	8,56
2	1130	55	0,89	1,28	460,0	2,46	48	425,0	96	4,24
3	1126	55	0,89	1,27	466,0	2,42	47	419,0	90	9,79

La Figura 1 presenta el contenido volumétrico de agua a lo largo del tiempo, para las tres columnas, observándose un rápido drenaje. Así, en los primeros 30 segundos, se produce el drenaje de entre el 25 y el 45% del agua de saturación. A partir del minuto 4 sólo queda del 11 al 20% del agua de drenaje y, a partir del minuto 40, entre el 5,5 y 6,0 %. Por tanto existe un flujo preferencial muy importante por lo que las columnas posiblemente filtrarán mucho mejor en condiciones no saturadas. Cuando se aplicó un flujo de agua de 1ml/min se determinó experimentalmente que son necesarios 100 minutos tras empezar el bombeo para alcanzar la condición de equilibrio (recogida de 1ml/min).

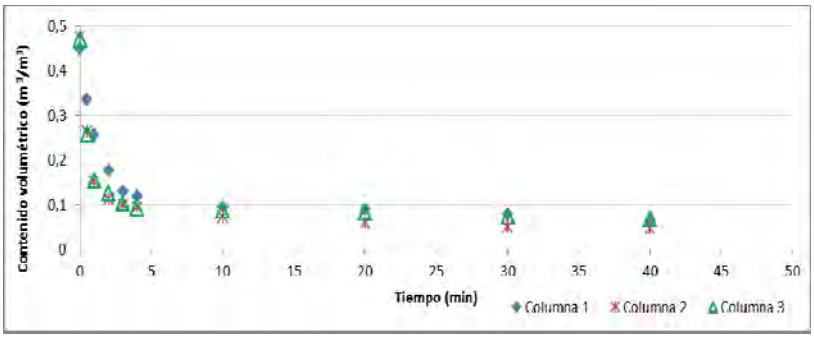


Figura 1. Contenido volumétrico de agua frente al tiempo en cada una de las columnas.

Caracterización del comportamiento de las columnas con sustancias no adsorbibles ni biodegradables (utilización del bromuro)

En la Figura 2a, se presenta la concentración de Br obtenido tras atravesar la columna en los intervalos de tiempo considerados. Se observa que en el minuto 100 se recoge muy poco Br pero su recuperación es muy rápida a partir de ese momento, obteniéndose pasadas 4 horas prácticamente la totalidad recuperada, que asciende al 90% de la cantidad aportada inicialmente. Estos resultados coinciden con otros estudios, donde se afirma que el Br es un ión que presenta un comportamiento de mínima reacción con el medio, por lo que se utiliza como trazador en estudios de suelo (Castillo et al., 1999).

Caracterización del potencial depurador con sustancias adsorbibles (uso del fosfato)

La Figura 2b, concentración de P frente al tiempo, se observa que se recupera un 60% del P introducido en la columna. Estos resultados coinciden con otros autores (Quintero, 1996). Comparando las figuras 2a y 2b se observa que la columna 1, con menos flujo preferencial, es la que presenta mayor adsorción.

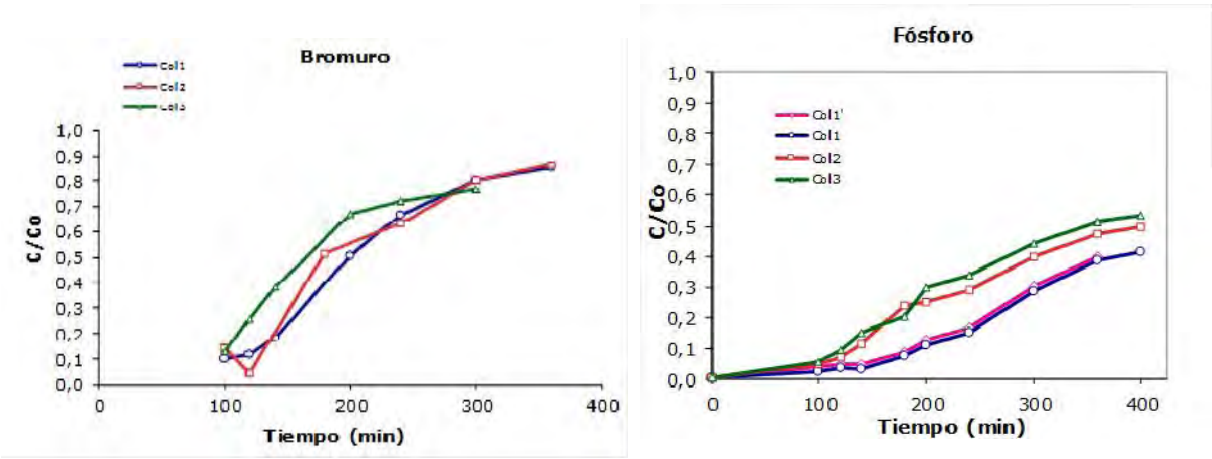


Figura 2. Concentración del trazador bromuro (a: izquierda) y fosfato (b: derecha) respecto al tiempo de muestreo

Caracterización del estiércol líquido
pH, CE, DQO, DBO_5 y SS.

En la Tabla 2, se presentan los valores de pH y CE del efluente antes de entrar en la columna 3 y a la salida de la columna 1, cuya disminución podría asociarse a la retención junto a la MO. La disminución de CE observada contrasta con el incremento obtenido por (Hernández et al, 2009) cuando humedecían el picón con agua destilada, obteniendo un incremento los 2 y 3 primeros días del contacto del agua con el picón.

Tabla 2. Valores de pH y CE del efluente antes de entrar a la columna 3 (pHe y CEe) y a la salida de la columna 1 (pHs y CEs), a 25°C.

pHe	CEe (µs/cm)	pHs	CEs (µs/cm)
7,58	4740	7,10	863
7,61	4706	7,09	864
7,60	4730	7,01	860
Media	Media	Media	Media
7,60	4740	7,07	862,33

En la Tabla 3, se presentan los resultados obtenidos del análisis de la DQO. Se observa que el porcentaje de reducción de la MO total es del 78%. El valor inicial de la DBO_5 del efluente es 380 mg/L O_2. Respecto a los SS, a la entrada el efluente tiene 10,53 mg/L y a la salida de la tercera columna (columna 1) tiene 0,79 mg/L, obteniéndose un porcentaje de reducción del 92,48%.

Tabla 3. Valores de DQO del efluente a lo largo del sistema

Muestra	DQO mg/l
M1 (antes de entrar en la columna 3)	526
M2 (a la salida de la columna 3)	425
M3 (a la salida de la columna 2)	320
M4 (a la salida de la columna 1)	115

Amonio y Fósforo total

En la Figura 3a se presentan las concentraciones de amonio a lo largo del tiempo en cada una de las columnas. Se obtiene una reducción del 10%, tras el paso por la columna 3, del 50% después de pasar por la columna 2 y de un 100% tras el paso por la columna 1. Esta reducción es compatible con la obtenida por Zurita y White (2014) que mencionan una reducción del 85% (que estos autores asocian al incremento del nitrato) utilizando un flujo

subsuperficial vertical en sólo dos fases. Por tanto, estos resultados demuestran que para conseguir una buena reducción son necesarias al menos dos columnas. La disminución de amonio es coherente con la alta capacidad de adsorción que tiene esta sustancia (Garcés y Morante, 2013). Se determinó también el nitrato, tanto en el efluente como en los diferentes intervalos de tiempo, obteniéndose valores por debajo del límite de cuantificación, lo que permite suponer que, en origen, todo el N mineral se encontraba en forma de amonio. Sin embargo, transcurridas 5 horas es posible que se haya producido una cierta nitrificación.

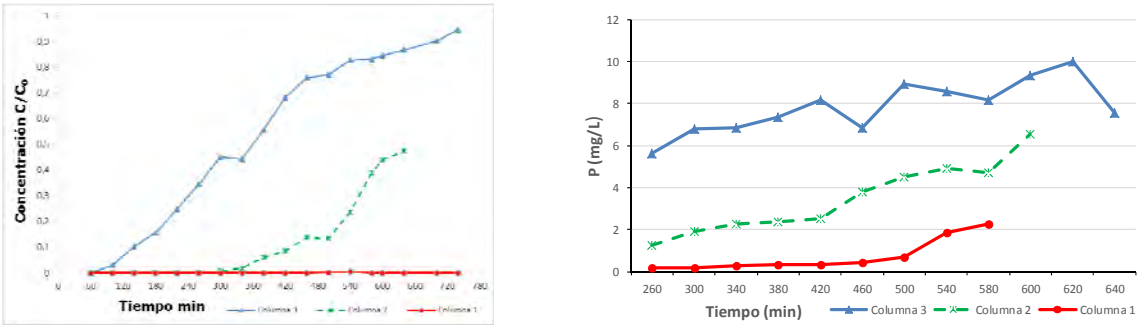


Figura 3. Valores de concentración de amonio (a: izquierda) y fósforo (b: derecha) a lo largo del tiempo en las 3 columnas.

En la Figura 3b, se presentan las concentraciones del Ptotal (en mg/L) a lo largo del tiempo tras el paso de las distintas columnas. El efluente de partida tenía 33 mg/L por lo que la reducción del P es importante (33%) ya desde el paso por la primera columna. Tras la segunda columna se obtiene una reducción cercana a un orden de magnitud. La reducción observada es superior a la medida para el fosfato reduciéndose la cantidad de P tras el paso de la última columna a prácticamente 0,5 mg/L .Este resultado es coherente con la presencia de P orgánico (que quedaría retenido junto con las partículas en suspensión). En filtros de riego convencionales y utilizando aguas depuradas sólo se obtuvo una reducción del Ptotal del 15% (Palacios et al., 2009), mientras que (Hernández Moreno et al., 2009), trabajando con efluente artificial pero con lapilli, obtienen una reducción muy importante en fosfato y compuestos orgánicos, que atribuyen a la capacidad de intercambio de los picones. Por tanto, el material elegido para el sistema de tratamiento resulta muy adecuado.

Metales.

En la Tabla 4, se presentan los resultados obtenidos para los cationes presentes en el efluente. Se observa que, en general, tras el paso por la columna 3 y una vez transcurrido el tiempo suficiente, apenas disminuyen en su concentración. Sin embargo, tras su paso por las columnas 2 y 1 sí se produce una reducción significativa de los mismos.

Tabla 4. Concentración de cationes (en mg/L) del efluente en los distintos intervalos de tiempo.

Columna	Tiempo	K	Na	Ca	Mg	B
Efluente inicial	-	329,4	448,4	169,2	75,9	1,02
3	100	45,7	176,7	108,7	51,4	0,62
3	300	250,5	413,4	164,6	78,7	0,95
3	680	331,9	480,1	152,3	79,4	1,08
2	100	5,9	36,8	19,4	12,0	0,20
2	300	27,6	174,8	107,4	55,4	0,40
2	460	101,5	298,8	157,8	70,8	0,55
1	100	28,3	69,2	26,5	12,8	0,22
1	300	23,3	62,4	23,8	12,1	0,19
1	420	14,4	39,9	15,6	8,1	0,12

CONCLUSIONES

El tratamiento del estiércol líquido de rumiantes para su posterior empleo en el riego enterrado de especies forrajeras y biocombustibles, utilizando materiales locales (en nuestro caso lapilli), y tecnologías de baja intensidad (filtración con flujo subsuperficial vertical en un medio no saturado, circulando por tres fases en serie) se ha demostrado como solución de bajo coste financiero y energético. Se ha caracterizado el comportamiento hidráulico del picón y su capacidad de eliminar sustancias, utilizando tres columnas rellenas de picón y un efluente de rumiantes con un flujo discontinuo de 10ml/min. Las reducciones obtenidos para la DQO y DBO_5 fueron 80, 90% respectivamente, mientras que para el amonio, P y SS superaron el 95%, que son valores asumibles para ser inyectados en el sistema de riego enterrado, actuando el suelo como medio de depuración avanzado.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por Ministerio de Economía y Competitividad. Subprograma de Proyectos de Investigación Fundamental (CGL2012-39520-C03-03) y Agencia Canaria de Investigación del Gobierno de Canarias (SolSubC200801000012). Agradecemos también la colaboración del Laboratorio Agroalimentario y Fitopatológico y a la Granja Agrícola Experimental del Cabildo de Gran Canaria.

REFERENCIAS

Abreu-Acosta, N. and Vera, L. (2011). *Occurrence and removal of parasites, enteric bacteria and faecal contamination indicators in wastewater natural reclamation systems in Tenerife-Canary Islands, Spain* Ecological Engineering 37 496–503

APHA-AWWA-WPCF. *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*.

Ayars, J.E., Bucks, D.A., Lamm, F.R. and Nakayama, F.S. (2007). Chapter 1: Introduction. Microirrigation for crop production: design, operation and management In F. R. Lamm, J. E. Ayars & F. S. Nakayama (Eds.), (pp. 1-26). Amsterdam: Elsevier.

Castillo, A., El Mabrouki, K. y Álvarez, P. (1999). *Experiencia de trazado con bromuro potásico en una parcela piloto de la ZNS del acuífero de la Vega de Granada.*

Garcés, M., (2013). *Caracterización mineralógica del depósito de zeolitas naturales en el río Guaraguau (Isidro Ayora, provincia del Guayas) y su aplicación en la remoción de amonio en aguas residuales.* Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL).

Hernández-Moreno, J.M., (2009). *Evaluación de la eficacia de diferentes materiales como sustrato para humedales artificiales en Canarias Proyecto sustradep: informe final.*

Johnson, G.R. and Olhoeft, G.R. (1984). *Density of rocks and minerals. In Carmichael, R.S. (Ed.), Handbook of Physical Properties of Rocks (Vol. 3): Boca Raton, FL (CRC Press), 1-38.*

Miller, R.W and R.L. Donahue (1995). *Soils in our environment. 7th Edtiton. Englewoods Cliffs, NJ: Prentice-Hall.*

Palacios-Díaz M.P., Mendoza V., Fernández-Vera J.R., Rodríguez MT Tejedor-Junco y Hernández-Moreno, (2009). *Subsurface drip irrigation and reclaimed water quality effects on phosphorus and salinity distribution and forage production.* Agricultural Water Management 96 Issue 11: 1659-1666.

Pescod (1992). "Wastewater treatment and use in agriculture" irrigation and drainage paper nº 47. FAO

Quintero, C.E. (1996). *Dosificación del Fósforo según Tipos de Suelos.* Agr. MSc

Zurita, F. y White, J.R. (2014). *Comparative Study of Three Two-Stage Hybrid Ecological Wastewater Treatment Systems for Producing High Nutrient Reclaimed Water for Irrigation Reuse in Developing Countries.* Water 6, 213-228

ISBN: 978-84-938046-4-0

ELIMINACIÓN DE MICROCONTAMINANTES ORGÁNICOS MEDIANTE TRATAMIENTOS AVANZADOS PARA UN USO POTABLE INDIRECTO DE AGUAS REGENERADAS

Cristina FERNÁNDEZ RODRÍGUEZ[1], Cristina AFONSO OLIVARES[2], María Ariadna MARTÍN GONZÁLEZ[1,3] , René Joel OJEDA GONZÁLEZ[1], Omayra DOMÍNGUEZ SANTANA[1], José Juan SANTANA RODRÍGUEZ[2], Pedro SUSIAL[3], José Miguel DOÑA RODRÍGUEZ[1]

[1] Grupo FEAM (Fotocatálisis y Espectroscopia Aplicada al Medioambiente). Departamento de Química, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 35017 Las Palmas de Gran Canaria, España, cfernandez@proyinves.ulpgc.es; ariadna.martin@ulpgc.es; odominguezsantana@gmail.com; rene.ojeda101@alu.ulpgc.es; jdona@ulpgc.es

[2] Grupo de Análisis Químico Medioambiental Departamento de Química, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 35017 Las Palmas de Gran Canaria, España, cristina.afonso@ulpgc.es; josejuan.santana@ulpgc.es

[3] Grupo IQT (Ingeniería Química y Tecnología). Departamento de Ingeniería de Procesos, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 35017 Las Palmas de Gran Canaria, España, pedro.susial@ulpgc.es

RESUMEN

En este trabajo se ha evaluado la utilización de procesos avanzados en la obtención de agua regenerada para un uso potable indirecto. Se ha investigado la eficacia de procesos de oxidación avanzada (UV/H_2O_2) y (UV/TiO_2), así como de adsorción sobre carbón activado, en la eliminación de 23 fármacos presentes habitualmente en aguas tratadas por tratamientos convencionales en EDAR urbanas, en concentraciones del orden de ng/L. El tratamiento con UVC y H_2O_2 resultó ser más eficiente que la fotocatálisis con TiO_2, ya que elimina el 100% de los fármacos estudiados. La presencia de materia orgánica y bicarbonato en agua microfiltrada procedente de un tratamiento de lodos activados, limitan la aplicación de la fotocatálisis heterogénea debido al envenenamiento de la superficie del catalizador así como a una competencia de los componentes del agua y los contaminantes en las reacciones con las especies oxidantes generadas. La utilización de carbón activado también resultó un tratamiento eficaz en la eliminación de los fármacos estudiados. Los resultados muestran que el carbón comercial Darko KB-G presenta una capacidad de adsorción promedio del 71% de los fármacos, mientras que la del carbón sintetizado en el laboratorio a partir de hojas de palmera Phoenix Canariensis fue del 56%.**Palabras clave:** *Microcontaminantes, EDAR, UV/H_2O_2, UV/TiO_2, carbón activado.*

Palabras clave: *Microcontaminantes, EDAR, UV/H_2O_2, UV/TiO_2, carbón activado.*

ABSTRACT

In this work, the use of advanced processes to obtain water for indirect potable

reuse, have been evaluated. The effectiveness of two advanced oxidation techniques, UV/H_2O_2 and UV/TiO_2, as well as adsorption process on activated carbon to eliminate twenty three pharmaceuticals, normally presents at concentration in the order of ng/L after secondary treatment of urban wastewaters, has been investigated. The combination of UVC and H_2O_2 was found more efficient than TiO_2 photocatalysis, since it degraded all the studied compounds. On the contrary, the presence of dissolved organic material and bicarbonates in water obtained after microfiltration of water from activated sludge treatment limit the application of TiO_2 supported photocatalysis due to the poisoning of the TiO2 surface as well as the scavenging of hydroxyl radicals photogenerated by others organic or inorganic compounds. This technology might be only applied after reverse osmosis of the effluent. The use of activated carbon was proved to be effective to adsorb most of pharmaceuticals studied. Commercial Darko KB-G and lab-made activated carbon obtained from *Phoenix Canariensis* palm frond mulch were compared and the results showed that commercial material present higher adsorption capacity than the lab-made material for the most of studied pharmaceuticals.

Key words: *Pharmaceuticals, SWTP, UV/H_2O_2, UV/TiO_2, activated carbon.*

INTRODUCCIÓN

La utilización de las aguas regeneradas para la recarga artificial de acuíferos es una realidad en países como Estados Unidos y Australia (Gerrity et al., 2013). Sin embargo, para evitar la presencia de microcontaminantes orgánicos presentes en aguas tratadas por procesos convencionales de depuración es necesario la aplicación de tecnologías avanzadas eficientes en la eliminación de estos contaminantes. Como microcontaminantes se entiende aquellos que se detectan en el medio ambiente en concentraciones de entre µg/L a ng/L o incluso menores. En base a su papel o uso industrial los microcontamitantes han sido agrupados como compuestos farmacéuticos y productos para el cuidado e higiene personal (PPCPs), compuestos disruptores hormonales (EDCs), surfactantes, pesticidas, fragancias sintéticas, retardantes de llama, aditivos industriales, y sus productos de transformación. La mayor parte de las plantas de tratamiento existentes para la obtención de aguas regeneradas cuya finalidad es un reuso potable indirecto utilizan como tratamientos terciarios, microfiltración o ultrafiltración seguida de ósmosis inversa. Finalmente utilizan UVC y H_2O_2 como tratamiento de oxidación ya que degrada los contaminantes que no pueden ser eliminados completamente mediante ósmosis inversa. Sin embargo, una de las principales desventajas de la ósmosis inversa es que genera aguas de rechazo que contienen una elevada concentración de microcontaminantes, de material orgánica y de otros constituyentes inorgánicos y que resulta poco eficiente en la eliminación de compuestos de bajo peso molecular. En este trabajo se ha evaluado la utilización de procesos avanzados de oxidación o de adsorción sobre carbón activado en la eliminación de compuestos farmacéuticos presentes en aguas residuales tratadas mediante tratamientos secundarios con el objeto de no generar aguas de rechazo de ósmosis inverso con altas concentraciones de contaminantes. Como procesos de oxidación avanzada se han utilizado la fotocatálisis con TiO_2 soportado sobre espumas cerámicas y la combinación de UVC y H_2O_2. La mayoría de los trabajos publicados en aguas reales contaminadas con microcontaminantes utilizan el TiO_2 en forma de polvo suspendido en agua. Sin embargo, la separación posterior del nanomaterial del agua tratada y el reciclado del catalizador resulta muy complicado e inviable desde el punto de vista económico (Miranda-García et al. 2010). Por lo que la utilización de un soporte inerte es necesario para la utilización de esta tecnología en tratamientos de elevados caudales de agua a tratar. En este trabajo se ha evaluado la utilización de espumas

cerámicas como soporte de TiO_2.

La utilización de carbón activado como tratamiento del agua previo a su posterior reutilización para un uso potable indirecto también se utiliza a escala piloto en plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas. En este trabajo también se ha comprobado la eficacia del carbón activado en la eliminación de estos 23 fármacos del agua microfiltrada de una EDAR urbana de la isla de Gran Canaria. Se ha comparado el carbón comercial Darko KB-G con otro carbón obtenido a partir de hojas de Palmera *Phoenix Canaeriensis* obtenido en el laboratorio.

MATERIAL Y METODOS

Preparación de TiO_2/espuma cerámica

Se sintetizó en el laboratorio un TiO_2 altamente fotoactivo en la eliminación de contaminantes en agua y se depositó sobre las espumas cerámicas Vukopor®, cuya composición es Al_2O_3 = 85 %, SiO_2 = 14.5 %, MgO = 0.8 % y área superficial específica 0.202 m^2/g, mediante un proceso de dip-coating. Posteriormente se calcinó la espuma con el material depositado a 700ºC. En la Figura 1 se observa una imagen del proceso de dip-coating utilizado para depositar el TiO_2, así como una imagen SEM de la superficie de la espuma antes y después de la deposición.

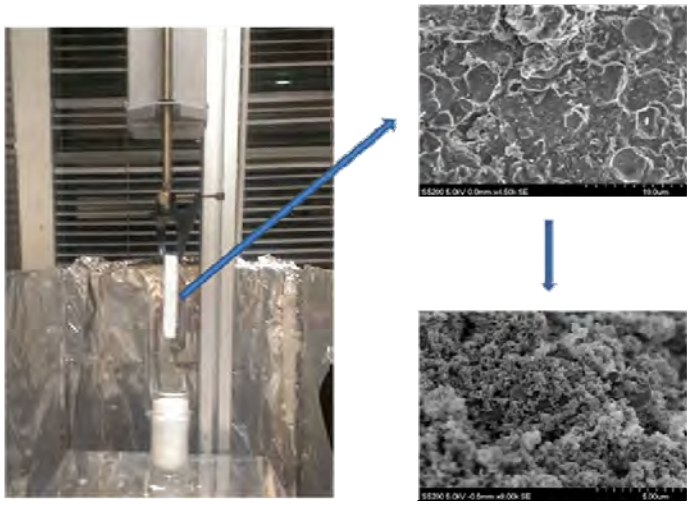


Figura 1. Imagen del proceso de dip-coating utilizado para la preparación de TiO_2 sobre espumas cerámicas.

Preparación de carbón activado

El carbón activado obtenido a partir de picado de hoja de palmera, *Phoenix Canariensis*, se ha preparado mediante activación química con ácido fosfórico y tratamiento térmico a 550ºC (Martín-González et al., 2014).

Reactores experimentales

La optimización de la dosis de H_2O_2 y los estudios de TiO_2 soportado se llevaron a cabo en un reactor de 1,5 L. Para los estudios de fotocatálisis se utilizó una lámpara de 15 W que emite radiación de entre 300-400 nm. Se utilizaron 12 espumas cerámicas Vukopor® de 5x5 cm con el fotocatalizador depositados que se dispusieron

en 3 bloques alrededor de la lámpara. Para los estudios de UVC se utilizó una lámpara de 14W que emite a 254 nm. Para los estudios de adsorción con los CA se utilizaron reactores de 300 mL para cada uno de los tiempos estudiados. Posteriormente se utilizó un reactor de acero inoxidable en continuo de 25 L de capacidad con 4 lámparas de 14W (potencia irradiada 15 W/m^2) para los estudios cinéticos de H_2O_2/UV. Se ha añadido adicionalmente 1 µg/L de cada uno de los fármacos al agua a tratar para la realización de un mejor seguimiento analítico de los procesos.

Determinación analítica

El contenido de fármacos presentes en el agua se siguió por LC-MS-MS utilizando SPE como método de extracción y purificación de las muestras de agua. Las concentraciones encontradas en el agua microfiltrada se detallan en la Tabla 1. Así mismo se analizaron los parámetros físico-químicos (Tabla 2) del agua utilizada en este estudio.

Tabla 1. Concentración de los fármacos detectada en el agua microfiltrada procedente de un tratamiento secundario en EDAR urbana.

Compuesto	Concentración (µg/L)	Compuesto	Concentración (µg/L)
Atenolol	0,33	Metamizol	<LDD
Bezafibrato	0,11	Metronidazol	0,63
Cafeína	0,41	Naproxeno	0,66
Carbamazepina	0,17	Nicotina	0,12
Ciprofloxacino	<LDD	Ofloxacino	0,14
Ácido Clofíbrico	0,02	Omeprazol	0,01
Diclofenaco	0,69	Paraxantina	0,68
Eritromicina	0,3	Propanolol	<LDD
Fluoxetina	0,11	Ranitidina	<LDD
Gemfibrocilo	0,57	Sulfametoxazol	0,13
Ibuprofeno	0,19	Trimetoprim	0,1
Ketoprofeno	0,54		

*LDD= Límite de detección

Tabla 2. Parámetros físico-químicos del agua utilizada.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
pH	7,97	$SO4^{2-}$ mg/L	66,2
Conductividad (µS/cm)	1369	NO_3- mg/L	22,26
DOC mg/L	14,8	PO_4^{3-} mg/L	97,50
UV_{254}	0,263	Na^+ mg/L	234,22
Turbidez (NTU)	1,08	K^+ mg/L	35,30
HCO_3^- mg/L	174,1	Mg^{2+} mg/L	14,71
Cl^- mg/L	344	Ca^{2+} mg/L	40,58
NO_2^-mg/L	8,91		

RESULTADOS

Los resultados de eliminación fotocatalítica de microcontaminantes con TiO_2 soportado sobre espumas cerámicas muestran que la degradación en el agua utilizada está fuertemente inhibida tal y como se muestra en la Figura 1. En la gráfica también se representan los resultados del porcentaje eliminado de cada uno de los fármacos tras añadir también 1 µg/L de cada uno de los fármacos al agua ultrapura y al efluente de ósmosis inversa obtenido en la misma planta de tratamiento. Se observa que en el caso del efluente de ósmosis inversa que degradación de los fármacos se sitúa entre un 40 y un 90% tras 45 minutos de tratamiento fotocatalítico. La presencia de materia orgánica y bicarbonatos en el agua microfiltrada limita la aplicación de esta tecnología a aguas con bajo contenido en materia orgánica y bicarbonatos debido al consumo de radicales de compuestos presentes a mayor concentración tal y como había sido publicado en un trabajo previo utilizando TiO_2 suspendido en aguas (Choi et al., 2014).

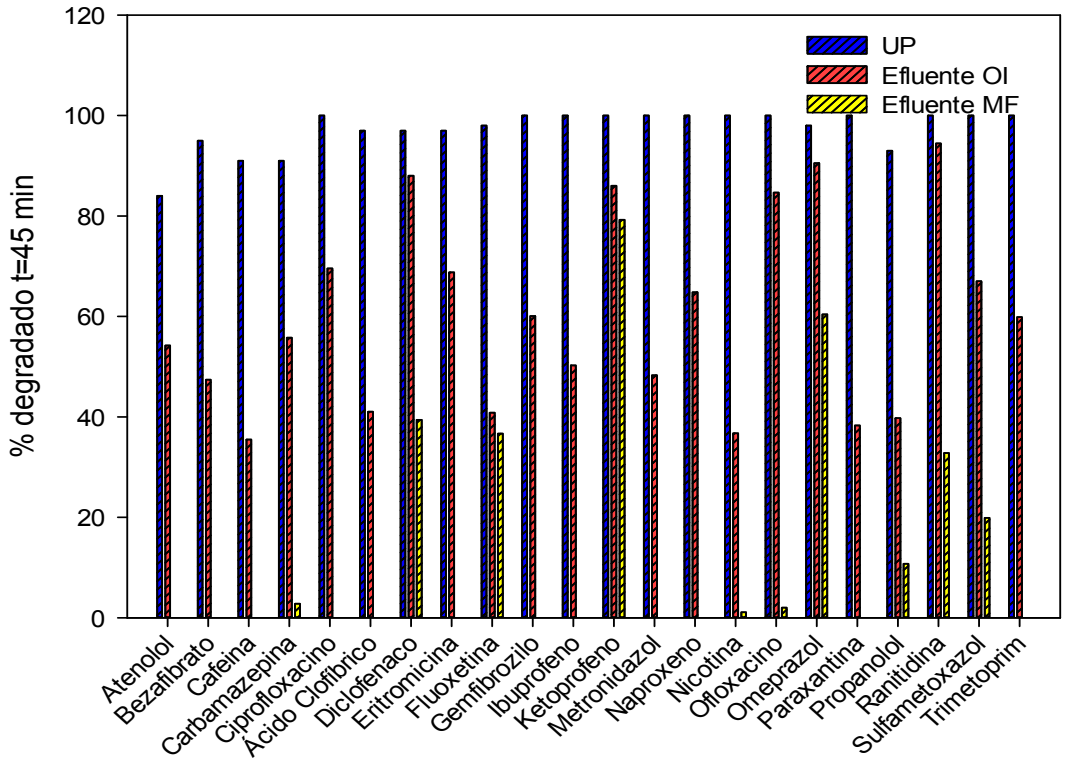


Figura 2. Porcentaje de cada uno de los fármacos degradados en agua ultrapura (UP), efluente de ósmosis inversa (OI) y efluente de microfiltración (MF), utilizando TiO_2/UV soportado sobre espumas cerámicas.

La tabla 3 presenta los resultados obtenidos tras la aplicación de UV/H_2O_2 al agua microfiltrada. Se ha optimizado la dosis de H_2O_2 necesaria para la eliminación de más del 90% de los fármacos. Como los resultados de eliminación promedio de fármacos utilizando entre 15 y 25 mg/L de H_2O_2 fue muy similar se utilizó el criterio de eliminación de Metronidazol, ya que se observaron diferencias significativas en la degradación de este compuesto a diferentes concentraciones de H_2O_2. La concentración óptima resultó ser de 20 mg/L de H_2O_2 ya que se eliminó este compuesto en más de un 90%.

Tabla 3. Promedio de fármacos eliminados y porcentaje de Metronidazol degradado, tras 45 minutos de reacción a distintas concentraciones de H_2O_2.

H_2O_2 (mg/L)	Promedio de fármacos eliminados (%)	% Metronidazol eliminado
5	70,28	57
15	94	79
20	93	92
25	97	100

A continuación se ha calculado la dosis de UV necesaria para la eliminación del 90% de los fármacos estudiados utilizando 20 mg/L de H_2O_2. Los resultados se muestran en la Figura 3.

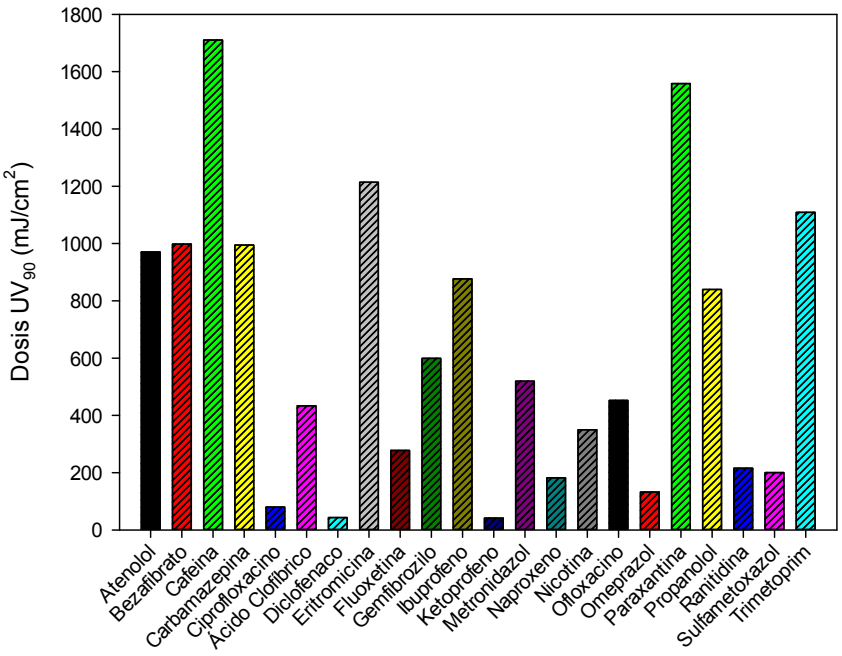


Figura 3. Dosis de UVC necesaria para eliminar el 90% de los fármacos estudiados.

Todos los fármacos cuya dosis de UV_{90} está por debajo de 200 mJ/cm^2 presentan una fotólisis elevada, siendo el diclofenaco y el ketoprofeno los fármacos que más se fotolizan. Por el contrario, la cafeína y su derivado paraxantina son los fármacos más resistentes a la degradación por UV/H_2O_2.

Finalmente se ha comparado la eliminación de los 23 fármacos del agua microfiltrada mediante la adsorción sobre dos tipos de carbón activado. El promedio de eliminación fue de un 71,26% utilizando el comercial Darko KB-G, el cual presenta un área superficial de 1469 m^2/g, un volumen de microporos y mesoporos de 0,58 y 0,67, respectivamente, siendo el pH de punto carga cero de 2,2. Sin embargo, el carbón activado sintetizado a partir de picado de hojas de la palmera, *Phoenix Canariensis,* cuyas características son un área superficial de 1345 m^2/g, un volumen de microporos y mesoporos de 0,49 y 0,34, respectivamente, y un pH de punto de cero carga de 3,1 presentó un porcentaje promedio de eliminación de un 52%. En la Figura 4 se detalla

el porcentaje de cada uno de los fármacos adsorbido por cada uno de los carbones.

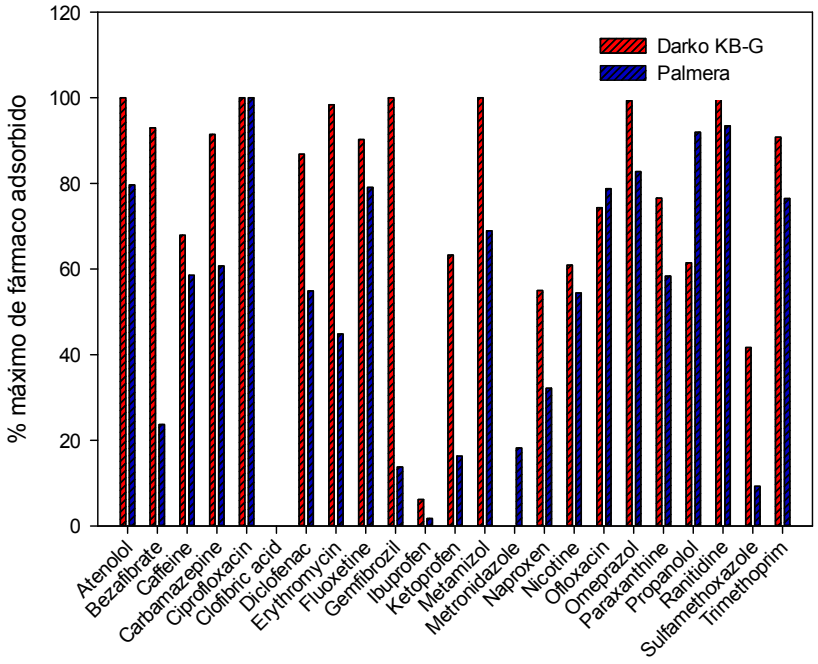


Figura 1. Porcentaje máximo de fármacos adsorbido utilizando carbón comercial Darko KB-G y uno sintetizado en el laboratorio a partir de Palmera, *Phoenix Canariensis*.

El carbón preparado en el laboratorio presentó un peor comportamiento en la adsorción de compuestos que presentan un pKa inferior a 6, como son los antiinflamatorios, el bezafibrato, el gemfibrozilo y el sulfametoxazol. En el caso de ibuprofeno el porcentaje de eliminación por *adsorción* de los carbones activados estudiados es muy bajo.

CONCLUSIONES

Tres procesos avanzados, como son la fotocatálisis con TiO_2, la combinación de UV y H_2O_2 así como la adsorción sobre carbón activado han sido evaluados como tratamientos para la eliminación de microcontaminantes en agua procedente de un tratamiento secundario en una estación depuradora de aguas residuales urbanas. El agua a tratar ha sido recogida tras someter el efluente a un proceso de microfiltración. 19 de los 23 fármacos estudiados han sido detectados, en concentraciones de entre 10 y 690 ng/L. La fotocatálisis heterogénea ha sido aplicada soportando el fotocatalizador sobre espumas cerámicas. La presencia de materia orgánica disuelta y bicarbonatos en el efluente del secundario limita la aplicación de esta tecnología. Sin embargo la combinación UV/H_2O_2 elimina totalmente los 23 fármacos evaluados. La concentración de H_2O_2 ha sido optimizada a un valor de 20 mg/L. La dosis de UV necesaria para la eliminación del 90% de cada uno de los fármacos estudiados ha sido establecida. Mientras que para la degradación de compuestos con una elevada fotólisis como son el diclofenaco o el ketoprofeno es necesaria una dosis de 43 y 41 mJ/cm^2 de luz UV, para la eliminación de compuestos más estables a la oxidación como son la Cafeína y su derivado Paraxantina es necesaria una dosis de 1710 y de 1558 mJ/cm^2.

La adsorción sobre carbón activado también resulta eficiente para la eliminación de la mayoría de fármacos estudiados. Los resultados muestran que el carbón comercial Darko KB-G presentó un promedio de adsorción del 71% frente a un 56% presentado por el sintetizado en el laboratorio a partir de hojas de palmera *Phoenix Canariensis*. El Ibuprofeno, Ácido Clofíbrico y Metronidazol presentaron un porcentaje de adsorción sobre los carbones estudiados inferior al 10%.

De entre los métodos avanzados estudiados la degradación con UV/H_2O_2 resultó ser el método más eficiente en la eliminación de los 23 compuestos farmacéuticos estudiados. Sin embargo, la adsorción sobre carbón activado presenta como principal ventaja sobre la oxidación con UV/H_2O_2 que no produce intermedios de degradación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al ministerio de economía y competitividad por financiar este trabajo a través del proyecto NANOBAC (IPT-2011-1113-310000). Así mismo, agradecen al Consejo Insular de Aguas la autorización para la recogida de agua de la EDAR. María Ariadna Martín González y Cristina Afonso Olivares agradecen las becas de investigación del programa ACIISI al Gobierno de Canarias y al programa de becas predoctorales de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, respectivamente.

REFERENCIAS

Choi, J.; Lee, H.; Choi, Y.; Kim, S.; Lee, S.; Lee, S.; Choi, W.; Lee, J (2014). *Heterogeneous photocatalytic treatment of pharmaceutical micropollutants: Effects of wastewater effluent matrix and catalyst modifications*. Applied Catalysis B: Environmental 147; 8-16.

Gerrity, D.; Pecson, B.; Shane Trussell, R.; Rhodes Trussell, R. (2013). *Potable reuse treatment trains throughout the world*. Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA 62, 6: 321-338.

Martín-González, M.A.; González-Díaz, O.; Susial, P.; Araña, J.; Herrera-Melián, J.A.; Doña-Rodríguez, J.M.; Pérez-Peña, J. (2014). *Reuse of Phoenix canariensis palm frond mulch as biosorbent and as precursor of activated carbons for the adsorption of Imazalil in aqueous phase of groundwater with special reference to saline/freshwater conditions*. Chemical Engineering Journa 245: 348-358.

Miranda-García J.N.; M.I. Maldonado M.I.; Coronado J.M.; Malato S. (2010*). Degradation study of 15 emerging contaminants at low concentration by immobilized TiO2 in a pilot plant* Catalysis Today 151; 107-113.

ISBN: 978-84-938046-4-0

MEJORA DEL APROVECHAMIENTO DEL AGUA EN LA PRODUCCIÓN DE FORRAJES

Vanessa MENDOZA-GRIMÓN[1], José Manuel HERNÁNDEZ-MORENO[2] y María del Pino PALACIOS-DÍAZ[1]

[1] Departamento de Patología Animal, Producción Animal y Ciencia y Tecnología de los Alimentos, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 35413 Las Palmas de Gran Canaria, España, v.mendozagrimon@ulpgc.es
[2] Departamento de Biología Animal, Edafología y Geología, jhmoreno@ull.es

RESUMEN

La problemática del suministro del agua en las regiones semiáridas limita el futuro del sector ganadero, puesto que por su elevado precio supone un alto porcentaje del coste total de la producción forrajera. El uso de recursos hídricos no convencionales utilizando sistemas de riego, cuya seguridad en el uso radique en el manejo y no en el nivel de tratamiento, potenciaría la sostenibilidad ganadera. El aporte de agua por kilogramo de materia seca producida debe ser muy eficaz para poder obtener el óptimo beneficio. Bajo esta premisa se ha establecido un cultivo de maralfalfa (*Penissetum* sp.) con un sistema de riego enterrado y agua regenerada. Se analiza la respuesta del forraje frente a una reducción de la dosis de riego del 40%, estimándose para las regiones más cálidas de Canarias, un rendimiento anual de 90 ó 72 t/ha de heno (aplicando o no reducción de dosis). Para ello sería necesario un consumo de agua anual entre 13000 y 9600 m^3/ha. Puede estimarse un valor de consumo hídrico al año de 21000 m^3/ha para la misma producción para el resto de las regiones costeras canarias. Por tanto, con la gestión del agua descrita se puede rentabilizar el cultivo de especies forrajeras en Canarias.

Palabras clave: coeficiente de consumo hídrico, *maralfalfa, sistema de riego enterrado, agua regenerada,* WUE

ABSTRACT

Water supply deficit in semi-arid regions limits the future of the livestock sector, since its high price is a high percentage of the total cost of forage production. Non-conventional water resources applied by subsurface drip irrigation (SDI), in which the safe use lies in the management and not on the level of water treatment, would enhance the ruminant production sustainability. To obtain the optimal benefit, the transformation of water per kilogram of dry matter produced has to be very effective. Under this premise, the maralfalfa crop (*Penissetum* sp.) has been established with a SDI system and reclaimed water. Forage yield is analyzed with respect to an 40% irrigation reduction. This study shows that this best management practice allows for an annual yield of 90 to 72 t/ha in the warmer regions of the Canary Islands. This implies a water consumption between 13000 and 9600 m^3/ha. A water consumption of 21000 m^3/ ha per year for the same production can be estimated for the rest of the Canary Islands coastal regions. The use of the water management described in this paper for fodder

production can be profitable in the Canary Islands.

Key words: water consumption coefficient, maralfalfa, subsurface drip irrigation, reclaimed water, water use efficiency: WUE.

INTRODUCCIÓN

La productividad del agua "blanca" o el uso eficiente de la misma, se define como la producción de biomasa por metro cubico de agua consumido, incluyendo tanto el agua "verde" (precipitación efectiva) como la "azul" (agua superficial y subterránea) en el caso de zonas regadas. Actualmente se reconoce que la producción de alimento para el ganado agota grandes cantidades de agua blanca, por lo que surge el concepto de productividad del agua para el ganado (Peden et al., 2007). La escasez de agua frena el desarrollo ganadero en las regiones semiáridas, puesto que por su elevado precio supone un alto porcentaje del coste total de la producción forrajera. Además, este sector no es capaz de competir con otros por el uso del agua, ya que los productos forrajeros tienen un precio por kg mucho más bajo que, por ejemplo, las hortícolas. En este sentido, el manejo del agua es esencial, sobre todo si se pueden encontrar fuentes de agua alternativas para el riego de forrajes, lo que potenciaría la sostenibilidad de la producción ganadera. Además, utilizando estos recursos no convencionales se podrían recuperar muchos suelos abandonados, disminuyendo así el impacto medioambiental que supone la erosión. En la actual legislación (RD1620/2007), los requerimientos de calidad de agua regenerada para riego de forrajes (calidad 2.2) son inferiores a los exigidos para otros usos. A pesar de ello, la legislación no tiene en cuenta el tipo de manejo que el agua recibe en el campo despreciando factores críticos sobre el éxito de un proyecto de reutilización como el tipo de riego, la dosificación y las condiciones agroambientales. El suelo puede actuar como medio depurador del efluente constituyéndose así en un tratamiento avanzado del agua, permitiendo el riego con aguas de inferior calidad y al mismo tiempo evitando la generación de problemas sanitarios. En esta línea, un estudio de la FAO concluye que en lugar de centrarse sólo en la calidad del agua residual, sería mejor evaluar y manejar los riesgos del uso de las aguas regeneradas para lograr la misma meta de garantía sanitaria (Winpenny et al., 2013). En este estudio también se determina que los sistemas de riego enterrado (SDI) son los que permiten el uso de efluentes con un nivel de tratamiento inferior pero alcanzando la misma seguridad sanitaria. En este sentido Palacios et al., (2009) concluyen que los SDI optimizan el uso del agua evitando su pérdida y proporcionan una mayor garantía sanitaria al evitar el contacto del agua regenerada con la planta cosechada. En un capítulo clásico, Jensen (1968) menciona que los estudios que relacionan los rendimientos de los cultivos con el uso consuntivo del agua se iniciaron hace más de un siglo. Este autor cita diversos factores que afectan a la eficiencia en el uso del agua, como la relación con los factores climáticos, la eficiencia en la aplicación del agua y la fisiología propia de las especies cultivadas.

Márquez et al., (2007) demostraron que la maralfalfa (Pennisetum sp) es una alternativa para aumentar la disponibilidad de forraje debido a su alta productividad de materia seca y valor nutritivo, siempre que se cumplan los requisitas mínimos exigidos para esta especie. Sin embargo, existen pocos estudios (Murillo Solano *et al* 2014) que hagan referencia a las necesidades hídricas de este forraje, lo que suele llevar a un mal uso de este recurso. El objetivo de este estudio ha sido la optimización del uso del agua regenerada en el cultivo de la maralfalfa en las condiciones edafoclimáticas de Canarias.

METODOLOGIA

Diseño experimental

El mes de febrero de 2014 se implantó un cultivo de Maralfalfa (híbrido *P. purpureum x P.*

glaucum) en una parcela situada en los terrenos de la Granja Agrícola Experimental del Cabildo de Gran Canaria, utilizando cañas de esta especie como material de trasplante. Dicha parcela cuenta con una estación meteorológica automática. En el periodo de estudio se realizaron tres cortes: 1er periodo productivo de febrero a mayo (corte el 22 de mayo), el 2º de mayo a julio (corte el 17 de julio) y el 3º de julio a septiembre (corte 17 de julio). Durante dichos periodos la precipitación fue de 3.7, 3.8 y 7.4 mm respectivamente, frente a los 160 mm de media anual de los últimos 14 años. La temperatura media de mínimas durante el periodo experimental fue de 17ºC, siendo la media de máximas de 25ºC. En el histórico de estos 14 años los valores medios de las temperaturas mínimas y máximas diarias fueron de 11 y 31ºC, respectivamente. El suelo de la parcela se clasifica como Anthrosol (ISSS/ISRIC/FAO, 1998) o Torriarent (Soil Survey Staff, 1998).

La parcela de 336 m^2 se dividió en dos bloques con dos tratamientos en cada uno. Un tratamiento consiste en aplicar el 100% de las necesidades de riego (100 % de la dosis suponiendo un coeficiente hídrico de consumo igual a 1 y que no existe precipitación) y el otro en una reducción del 40% de las necesidades. Cada tratamiento consta de cinco líneas de forraje, coincidiendo con las líneas de riego. Dichas líneas se encuentran separadas a 0.75 m.

En el tercer corte se realizó una abonado con un producto compatible con la agricultura ecológica (certificación nº CE/19287) (Lignoser) a razón de 1,1 g/m^2 N, abono que también aporta ácido fúlvico, K y oligoelementos.

Análisis del suelo

Se tomaron muestras compuestas entre 0 y 0,2 m de profundidad, coincidiendo con el trasplante y el día en el que se realiza cada corte. Los resultados se presentan en la Tabla 1 para cada uno de los bloques. Para la determinación de carbono orgánico (CO, en %) y el nitrógeno total (N tot, expresado en %) se utilizó la técnica de combustión seca con un analizador LECO CNS 2000. Las sales solubles se estimaron por la conductividad eléctrica (CE, en dS/m) 1:5. El nitrato (expresado en mg/kg disponible se determinó por la extracción con cloruro cálcico 0.01 M, para posteriormente ser analizados por cromatografía iónica. El fósforo (P, expresado en mg/kg) disponible se determinó según el método de Olsen y Sommers (1982). Los cationes intercambiables se extrajeron con acetato amónico tamponado a pH 7. Los cationes extraídos (expresados en meq/100 g) son: potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na), y el resto (expresado en mg/kg): boro (B), hierro (Fe), cobre (Cu), manganeso (Mn) y zinc (Zn) se analizaron por espectrofotometría de emisión óptica (ICP_OES).

Caracterización del forraje

Se pesó en campo la producción en materia fresca en cada uno de los cortes de las diferentes líneas de forraje. Así mismo, se tomaron muestras compuestas en los diferentes tratamientos para la determinación del porcentaje de la materia seca (MS), así como macro y microelementos (Tabla 2). La determinación de MS se realizó en estufa a 60ºC hasta llegar a peso constante. Se determinó el N (expresado en %) mediante la técnica de combustión seca en LECO CNS 2000. Para el resto de elementos analizados P, K, Ca, Mg, Na (expresados en %), B, Cu, Fe, Mn y Zn (expresado en mg/kg), se utilizó la técnica de digestión con ácido nítrico en el microondas, para su posterior análisis por ICP_OES.

Sistema de riego

Para la aplicación del agua regenerada se utilizó un sistema de riego enterrado (SDI) con goteros integrados autocompensantes, antidrenantes y con mecansmos antisifón (modelo

Techline) separados a 0.5 m y con un caudal nominal de 2.3 L/h. Las líneas de riego se encuentran separadas a 0.75 m. Se ajustó el tiempo de riego para aplicar una dosis constante equivalente a la ET media del periodo. Así, diariamente se dieron dos riegos con una duración de 20 y 12 minutos respectivamente para los tratamientos 1 y 2, a partir del segundo mes tras el trasplante. Cada tratamiento consta de un caudalímetro, cuya lectura se realiza semanalmente. En la Tabla 3 se muestra el consumo de agua (L/m^2) para los diferentes periodos de corte.

Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó mediante el programa SPSS (versión 22) por los procedimientos de Modelo Lineal Generalizado. El modelo incluye la producción obtenida (expresada en kg de materia seca/m^2 en función de la fecha de corte), la dosis de agua aplicada (control y reducción de la dosis un 40%) y su interacción. La media de la separación fue probada usando la diferencia menos significativa (LSD), teniendo en cuenta un nivel de significación del 5% (p = 0.05)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1 se presentan los datos climáticos correspondientes al periodo de estudio. Se observa un progresivo incremento de la T media y unos valores de radiación relativamente bajos para la época de estudio (mayor radiación en junio que en julio y agosto).

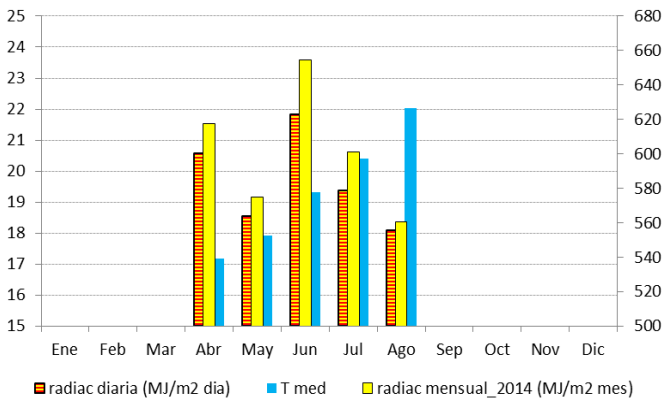


Figura 1. Datos meteorológicos correspondientes al periodo de estudio: radiación diaria (radiac diaria) expresado en MJ $m^{-2}día^{-1}$, Temperatura media, expresado en ºC (Tmed) y radiación mensual (radiac mensual) expresado en MJ $m^{-2}mes^{-1}$.

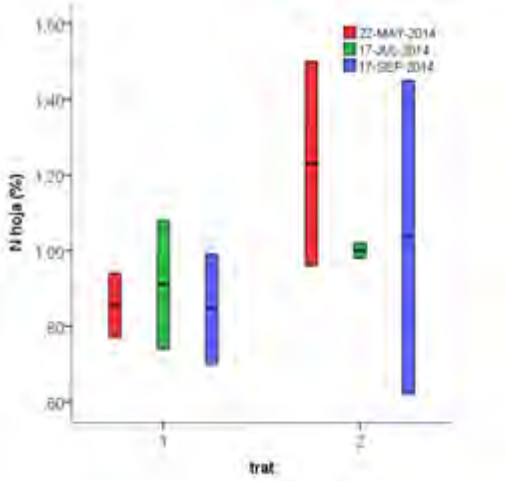


Figura 2. Contenido de Nitrógeno, expresado en %, en hojas para los dos tratamientos (100% y 60% de la dosis), para las tres fechas de corte.

La evolución de los nutrientes en suelo que se desprende del análisis de los datos presentados en la Tabla 1, muestra que los elevados contenidos de MO, así como el contenido de N total se mantienen estables, lo que resulta coherente con la baja relación C/N. Parece existir una ligera tendencia hacia la salinización del horizonte superficial (compatible con el manejo del agua propia del sistema de riego enterrado y la ausencia de lluvia), aunque las diferencias que existen entre las repeticiones no permiten que se muestre significación alguna. El contenido de nitratos disminuye ligeramente en el tiempo, aunque parecería permanecer en valores aceptables (entre 321 y 114 mg/kg para septiembre) para garantizar un adecuado crecimiento de esta gramínea. Sin embargo se mostraron síntomas de carencia de N en planta, coincidiendo con valores bajos de contenido de N en hoja

(Figura 2) por lo que se procedió al abonado. Estos contenidos de N se corresponden con unos valores de proteína bruta (PB) entre 5,3 y 7,7 %, valores que efectivamente son inferiores a los que se esperarían para plantas cosechadas a los 60 días (8.8%, Palacios et al., 2013. Esta aparente contradicción entre los valores de nitrato en suelo y N en hoja se explica porque el muestreo de suelo se realizó en los primeros 0,2 m y debido al manejo del agua propia del sistema de riego enterrado: a esa profundidad apenas hay sistema radicular por lo que no es capaz de absorber el nitrato concentrado por fenómenos de ascenso capilar. El contenido de oligoelementos se incrementa para el tercer corte, lo que parece estar influido por la utilización del abono enriquecido.

Tabla 1. Determinación de materia orgánica (MO, expresado en %), el nitrógeno total (N tot, expresado en %), conductividad eléctrica (CE, en dS/m) 1:5, El nitrato (expresado en mg/kg disponible, fósforo (P, expresado en mg/kg), Los cationes extraídos (expresados en me/100 g) son: potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na), y el resto (expresado en mg/kg): boro (B), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn) y zinc (Zn).

		pH	CE 1:5	MO	C/N	N tot	Nitrato	P	K	Ca	Mg	Na	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Trasplante		8,1	1,23	6,61	10,55	0,36	498	152	9,58	24,83	8,85	5,80	6,63	-	-	-	-
Mayo	B1T1	8,5	0,92	3,10	8,50	0,21	204	147	11,00	18,30	8,60	5,10	6,60	1,60	4,90	12,90	4,45
	B1T2	8,6	0,59	2,83	9,10	0,18	172	98	7,00	19,40	9,10	4,20	6,10	1,70	5,10	12,00	4,07
	B2T1	8,6	0,53	2,93	8,30	0,20	138	99	4,90	19,20	9,10	3,10	6,60	1,60	4,10	12,90	3,91
	B2T2	8,6	0,48	2,18	7,80	0,16	132	51	4,00	21,60	9,70	4,00	5,30	1,80	4,60	14,40	4,07
Julio	B1T1	8,5	1,26	2,99	8,60	0,20	390	138	12,80	23,10	5,50	7,20	9,00	0,97	2,80	10,30	2,44
	B1T2	8,4	0,71	2,93	8,00	0,21	271	113	6,70	26,50	6,80	5,20	7,60	1,30	4,10	12,40	3,09
	B2T1	8,5	0,85	3,44	8,60	0,23	199	209	6,80	28,80	6,40	6,50	7,20	0,93	2,60	11,80	2,54
	B2T2	8,4	0,58	2,53	8,40	0,17	141	58	4,40	30,20	7,10	4,70	5,80	1,00	2,60	14,40	1,99
Septiembre	B1T1	8,5	1,63	3,27	8,90	0,21	321	160	14,30	34,20	10,50	7,80	6,50	3,00	8,80	27,80	8,12
	B1T2	8,5	0,85	3,00	8,70	0,20	178	122	7,40	42,00	11,80	5,80	6,30	2,50	7,60	30,40	8,66
	B2T1	8,5	0,81	3,34	8,70	0,22	178	88	6,50	13,40	5,80	5,90	8,10	2,20	6,50	25,40	6,32
	B2T2	8,4	0,71	2,72	8,80	0,18	114	52	4,40	16,40	5,70	5,30	7,40	2,10	5,70	33,80	6,71

Los contenidos de nutrientes en hojas (Tabla 2) permanecen relativamente estables, aunque en ligera disminución en el tiempo. En la Figura 2 se observa una tendencia hacia mayores contenidos de N en hoja en el tratamiento de dosis reducida, aunque dichas diferencias no se mostraron significativas. El P en hoja presenta valores normales, aunque con un amplio intervalo de variación (entre 0,2 y 0,4 %). Respecto a los oligoelementos, y al igual que ocurría con el N, no se observa relación entre los incrementos medidos en suelo tras el abonado y los contenidos en hoja.

Tabla 2. Determinación de materia seca (MS, expresado en %), el nitrógeno (N), fósforo (P) potasio (K),calcio (Ca), magnesio (Mg) y sodio (Na), expresados en % y el resto de elementos (expresado en mg/kg): boro (B), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn) y zinc (Zn) para el forraje cosechado en las diferentes fechas y para cada uno de los tratamientos.

		MS	N	P	K	Ca	Mg	Na	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Mayo	B1T1	8,82	0,9	0,2	5,9	0,2	0,1	0,09	11	6	75	42	25
	B1T2	9,74	1	0,3	5,4	0,2	0,1	0,07	11	6	73	41	27
	B2T1	10,01	0,8	0,4	5,6	0,1	0,1	0,04	12	5	53	31	21
	B2T2	9,65	1,5	0,2	5,5	0,2	0,2	0,06	8	6	82	55	26
Julio	B1T1	9,56	1,1	0,3	5,2	0,2	0,2	0,07	17	5	104	38	31
	B1T2	9,56	1	0,4	5,3	0,1	0,2	0,05	18	5	88	38	43
	B2T1	9,56	0,7	0,4	5,1	0,1	0,1	0,04	16	5	58	32	44
	B2T2	9,56	1	0,3	4,6	0,1	0,1	0,04	16	5	55	30	29
Septiembre	B1T1	21,94	0,7	0,4	5,2	0,1	0,1	0,04	11	5	79	25	35
	B1T2	21,09	0,6	0,3	4,1	0,1	0,1	0,04	11	4	59	21	25
	B2T1	20,58	1	0,3	4,7	0,1	0,2	0,03	12	4	62	19	38
	B2T2	22,57	1,5	0,2	3,6	0,2	0,2	0,03	17	4	91	35	34

Se observa un fuerte incremento de la MS obtenida en el tercer corte, que resulta significativamente superior a los otros dos (Figura 3a). Este superior contenido en MS parece ser consecuencia de las temperaturas más elevadas medidas en este periodo. Por ello se ha calculado la integral térmica (IT) para los tres periodos de estudio (Tabla 3), como suma de las temperaturas diarias por encima de los 10ºC (cero de vegetación para esta especie, Cook, et al 2005). La IT del primer periodo es muy alta, pues se trata de la fase de implantación (100 días). Pero, cuando se comparan los periodos 2 y 3, con aproximadamente el mismo número de días pero una IT un 25% más baja para el segundo periodo, se observa un contenido inferior de MS y una producción total significativamente inferior con respecto al tercer periodo.

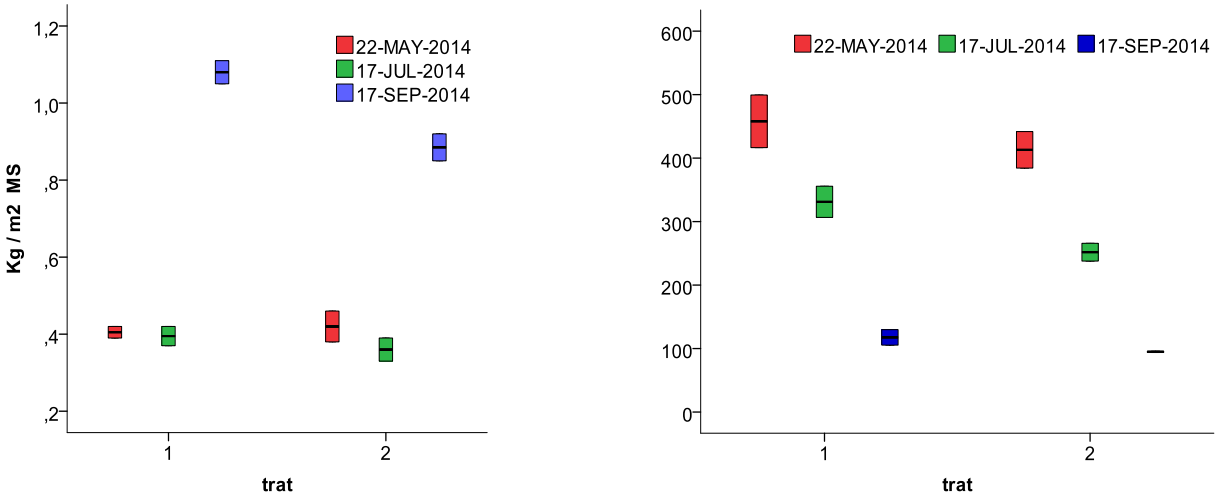


Figura 3: a) rendimiento (kg/m^2 MS) y b) consumo hídrico (L/kg MS) para los dos tratamientos (100% y 60% de la dosis) y para las tres fechas de corte.

En la Tabla 3 se muestran el consumo de agua (L/m^2) y la producción (kg /m^2 MS) para los diferentes periodos productivos. Los consumos de agua realmente aplicados divididos entre la ET, muestran que el coeficiente de consumo medio ha sido de 0,9; 1 y 0,9 para los tres periodos de corte en el T1, mientras que para el T2 fueron de 0,7; 0,6 y 0,5 respectivamente. Por tanto, los coeficientes de consumo hídrico para el control son ligeramente superiores (y para el T2 ligeramente inferiores) a los obtenidos por Murillo Solano et al., (2014) ya que estos autores citan para ET de 3 L/m^2, una Kc entre 1 y 0,7. De hecho, como se observa en la Figura 3b, los consumos de agua demuestran diferencias significativas entre la producción obtenida y la dosis de agua aplicada a partir del segundo corte, siendo mayor la producción para la dosis control (516 y 182 L/kg MS para el T1 frente a 355 y 134 L/kg MS para el T2, en los dos últimos cortes). Sin embargo, en el primer corte no se observan diferencias. Dependiendo del precio del agua convendrá o no una reducción de la dosis de riego tan acusada.

Tabla 3. Período de tiempo (días), integral térmica (IT), radiación (rad, en MJ/m^2), consumo de agua (L/m^2) evapotranspiración (ET, en L/m^2) acumulada y media mensual, consumo agua / ET (%) y producción (kg/m^2 MS) y consumo de agua por kg de materia seca (L/kg MS) producida para los diferentes tratamientos y periodos de cultivo.

	dias	IT	rad	consumo agua		ET		consumo/ET		kgMS/m2		L/kg MS		kgMS/m2		L/kg MS	
		periodo	periodo	L/m2		L/m2		%		T1				T2			
		º	MJ/m2	T1	T2	acumulada	media	T1	T2	med	std	med	std	med	std	med	std
22-may	100	900	1862	287	243	333,1	3,3	86,2	73,0	0,40	0,02	712	40,64	0,42	0,06	583	81,10
17-jul	55	519	1097	203	127	211,4	3,8	96,0	60,1	0,40	0,03	516	41,41	0,36	0,04	355	42,50
17-sep	60	706	1183	197	118	224,3	3,6	87,8	52,6	1,08	0,04	182	6,98	0,88	0,05	134	7,58

Los coeficientes de consumo hídrico obtenidos para el tercer corte, una vez la planta ya está establecida y con unas temperaturas muy favorables para este cultivo, son excepcionalmente favorables (Figura 4a). En esta figura se observa que, para el tercer corte, se obtienen los mejores rendimientos, pese a que la cantidad de agua aplicada fue pequeña. Esto fue posible porque el coeficiente de consumo de agua es extraordinariamente favorable (182 y 134 L/kg MS, para cada uno de los tratamientos). A este hecho contribuye la elevada eficiencia en el uso del agua (WUE), cuyos valores se presentan en la Figura 4b (muy superiores a los mencionados para una gramínea C3 por Zhang y Oweis, 1999) que pueden explicarse por el tipo de riego (prácticamente toda el agua suministrada es absorbida por la planta), el manejo de agua (baja dosis dos veces al día) y la fisiología de la planta (metabolismo C4). En estas condiciones la producción de maralfalfa es muy eficiente en el uso del agua, pudiendo estimarse que para una producción de 90 ó 72 t heno/ha respectivamente (con o sin reducción de la dosis de riego), la cantidad de agua consumida sería de 13200 m^3/ha o de 9600 m^3/ha.

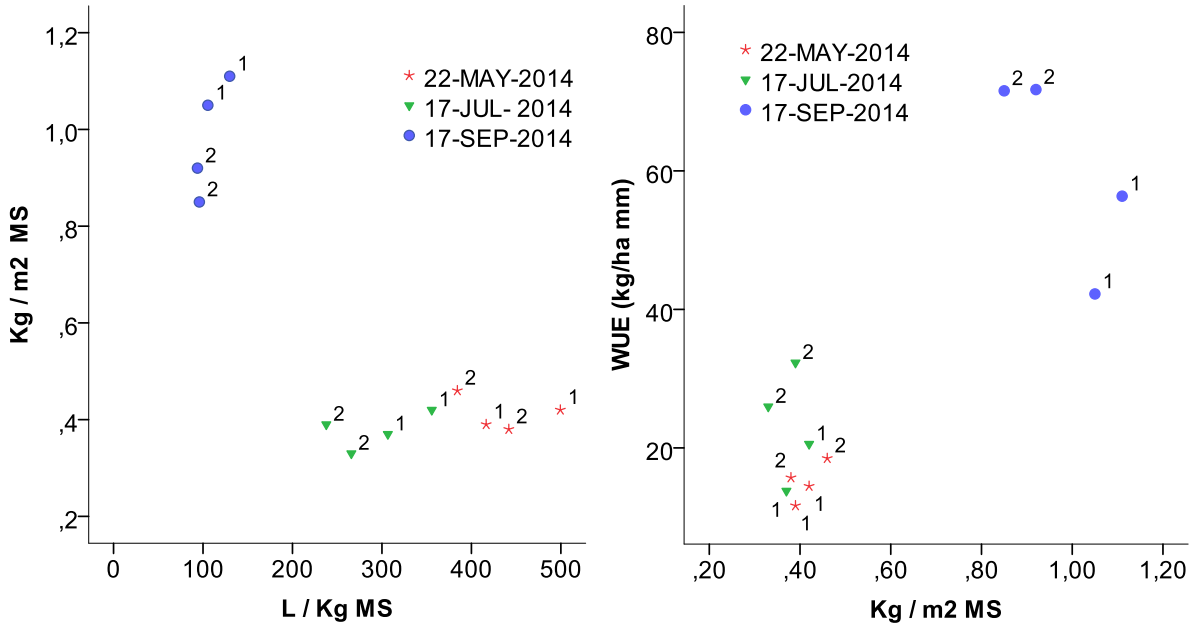


Figura 4. Rendimiento (kg/m^2 MS) y consumo hídrico (L/kg MS) para los dos tratamientos (100% y 60% de la dosis) y para las tres fechas de corte (A: izquierda), y relación entre el WUE y el rendimiento obtenido para las tres fechas y los dos tratamientos (B: derecha).

CONCLUSIONES

La producción de forrajes en zonas cálidas de Canarias es posible con un buen manejo del agua, siempre que se utilice la tecnología adecuada pese al elevado precio del agua en las islas. Para ello necesitamos emplear un sistema de riego con alta eficiencia en la aplicación del agua, una especie que aproveche las buenas condiciones de temperatura y radicación, así como unos recursos hídricos no convencionales cuya seguridad en el uso radique fundamentalmente en el manejo y no en el nivel de tratamiento.

Cuando se utilizan sistemas de riego enterrado se modifica el perfil explorado por las raíces, lo que debe de ser tenido en cuenta a la hora de muestrear el suelo y aportar los nutrientes, sobre todo cuando hablamos de especies muy exigentes en estos elementos.

Nuestros estudios permiten estimar un rendimiento anual de 90 ó 72 t/ha de heno (aplicando o no reducción de dosis del 40%), con un aporte de agua entre 13000 y 9600 m^3/ha para las regiones más cálidas de Canarias, y cuyas temperaturas medias mensuales sean iguales o superiores a 22ºC. Para el resto de las regiones costeras en las que el

crecimiento de esta especie sea posible, un valor de consumo hídrico anual conservador puede estimarse para la misma producción en 21000 m^3/ha.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por Ministerio de Economia y Competitividad. Subprograma de Proyectos de Investigación Fundamental (CGL2012-39520-C03-03) y Agencia Canaria de Investigación del Gobierno de Canarias (SolSubC200801000012). Agradecemos también la colaboración del Laboratorio Agroalimentario y Fitopatológico y a la Granja Agrícola Experimental del Cabildo de Gran Canaria.

REFERENCIAS

Cook, B.G.; Pengelly, B.C.; Brown, S.D.; Donnelly, J.L.; Eagles, D.A.; Franco, M.A.; Hanson, J.; Mullen,B.F.; Partridge, I.J.;Peters, M. and Schultze-Kraft, R. (2005). *Tropical Forages: an interactive selection* tool., [CD-ROM], CSIRO, DPIandF(Qld), CIAT and ILRI, Brisbane, Australia. pical East Africa. Part 3. Rotterdam, **a**vailable at: http://www.tropicalforages.info/;

ISSS/ISRIC/FAO, 1998. *World Reference Base for Soil Resources*. World Soil Resources Report 84. FAO, Rome.

Jensen, M.E. (1968). *Water consumption by agricultural plants.* In: Kozlowski, T.T. (Ed.), Water Deficits and Plant Growth. Vol. 2. Academic Press, New York. pp. 1–22

Márquez, F.; Sánchez, J.; Urbano,D. and Dávila, C. (2007). *Evaluación de la frecuencia de corte y tipos de fertilización sobre tres genotipos de pasto elefante (Pennisetum purpureum*). 1. *Rendimiento y contenido de proteína.* Zootecnia Trop. 25(4) 253-259.

Murillo Solano, J,; Barros Henríquez, J.A.; Roncallo Fandiño, B. and Arrieta Pico, G.(2014) *Requerimientos hídricos de cuatro gramíneas de corte para uso eficiente del agua en el Caribe seco colombiano*. Corpoica Cienc. Tecnol. Agropecu. 15(1) 83-99 .

Olsen, S.R., L.E. Sommers (1982). *Phosphorus*. pp 403-430. In: A.L. Page et al.(eds.) Methods of soil analysis, part2. Agron. Mongr.9. 2nd ed. ASA and SSSA, Madison, WI.

Palacios-Díaz M.P.;Mendoza-Grimón, V.; Fernández-Vera, J.R.; Rodríguez-Rodríguez, F.; Tejedor-Junco, M.T. and Hernández-Moreno, J.M. (2009). *Subsurface drip irrigation and reclaimed water quality effects on phosphorus and salinity distribution and forage production*. Agricultural Water Management 96, 1659–1666

Palacios-Díaz M.P.; Mendoza-Grimón, V.; Fernández-Vera, J.R. and Hernández-Moreno, J.M. (2013) *Effects of defoliation and nitrogen uptake on forage nutritive values of Pennisetum sp*. J Anim Plant Sci 23: 566–574. 2013. Available from URL: http://www.thejaps.org.pk/docs/v-23-2/37.pdf

Peden, D., Tadesse, G., and Misra, A.K. (2007). Water and livestock for human development. In: Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture. (Ed. D. Molden.) pp. 485-514. (Earthscan: London, and the International Water Management Institute: Colombo).

RD1620/2007. *REAL DECRETO 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.*

Soil Survey Staff, 1998. Keys to Soil Taxonomy, 8th ed. U.S.D.A. - NRCS, Lincoln.

Winpenny, J.; Heinz, I. and Koo-Oshima, S. (2013). *Informe sobre Temas hídricos* FAO, 35 Reutilización del agua en agricultura: Beneficios para todos?

Zhang, H and Oweis, T. (1999). *Water–yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region.* Agricultural Water Management Vol 38 (3): 195-211

ISBN: 978-84-938046-4-0

OTROS APUNTES PARA LA HISTORIA DE LA DESALACIÓN EN CANARIAS

Fernando Andrés OJEDA PÉREZ

Ingeniero Industrial, dedicado a la desalación en los últimos 26 años.
thalassojeda@gmail.com

RESUMEN

Por los años 60, en la segunda mitad del siglo XX, arrancan las primeras desalinizadoras en Canarias, y por extensión en España. Esto es preámbulo ya trillado en cualquier historia que se precie sobre la desalación en España. Pero existen algunas noticias anteriores que aportan datos sobre fechas más antiguas en que la desalación del agua de mar fue un hecho...Pretendemos aportar algunas noticias, algo antiguas, al respecto. Pongamos que hablamos del siglo XVII hacia acá. Y dado que de agua mar tratamos...nada mejor que un viaje por los continentes africano, americano y europeo. Se incluye alguna relación de la industria de la caña de azúcar y los procedimientos para extraer agua dulce (también) del mar. Aportamos algunas ideas y datos sobre la evolución de los diferentes procesos usados en la desalación de agua de mar, con un somero repaso sobre el tratamiento del agua salobre.

Palabras clave: *Historia, desalación, Canarias*

ABSTRACT

By the 60s, in the second half of the twentieth century, the first desalination plants were implanted in the Canaries, and by extension in Spain. This is the preamble yet known in any story that claims about desalination in Spain. But there are some older items that provide data on older times when the desalination of seawater was done ... We intend to bring some old news respecting to this issue. Speaking about the seventeenth century until now, and due to we are treating to sea water ... nothing better than a trip to the African, American and European continents. Relations between industry sugarcane and procedures to extract fresh water (well) from the sea are included. We provide some ideas and data on the evolution of the various processes used in the desalination of seawater, including a brief review of the treatment of brackish water.

Key words: *History, desalinization, Canary Islands.*

HAWKINS AÑO DE 1.600

El famoso escritor inglés Samuel Coleridge, en su balada del viejo marinero, decía "*agua, agua, por doquier, pero ni una gota para beber*".

Entre los años 1600 a 1603, el Caballero inglés Richard Hawkins (1562-1622) logró el agua dulce de la salada del mar por medio de la destilación como se colige de la Colección de Viages de Purchass Era hijo de John Hawkins conocido en Canarias-1560 como AQUINES, que vino en la expedición de Drake de 1595 y murió el 22 de noviembre de este año.

"Aunque carecimos del agua dulce durante muchos días, no obstante con una invención que tenía en mi navío extraxe fácilmente el agua dulce de la salada del mar en bastante cantidad para mi tripulación, y sin mucho consumo de combustible; puesto que con quatro leños destilé 63 azumbres de agua con que se aderezó la comida para los enfermos y los sanos, y sirvió para todos los usos. El agua que se destiló de esa manera era muy sana, y sustentaba bien la gente"

Apunto aquí la hipótesis siguiente: la familia Hawkins, formada por Richard, su padre John, su tío Williams (pariente de Drake) y abuelo Williams. Todos ellos dedicados a la piratería como oficio y beneficio. ¿Llegaron a desalar agua de mar en las cercanías de Canarias?

Les traigo aquí otra noticia fresca aparecida en las hojas de un periódico ya rancio. En la sección marítima y mercantil del ECO DEL COMERCIO tinerfeño del 25 de marzo de 1863 leímos: *"El vapor inglés de hélice Norseman, que fondeó el día 22. arribó á este puerto a reponer su combustible, aguada y víveres. A este buque se le concluyó el agua dos días antes de llegar,* ***y para convertir la salada en dulce tuvo que quemar su cámara y vergas por haberle faltado también el carbón de piedra****. Va a reparar aquí todas sus averías".*

LA VERDAD AÑO DE 1872

Ya sobre aviso de que se desalaba agua de mar a bordo de los barcos para sobrevivir en largas travesías, buscando noticias antiguas que arrojasen luz sobre hechos modernos; descubro que la historia es así de reiterativa. Encuentro en la isla que vio nacer el Diario de Avisos, algo de Verdad sobre ello. **La Verdad** desala!, bueno, no me refiero a que la verdad asusta., no ! ; quiere uno decir que en el velero **La Verdad**....." 12 de abril de 1872, Sábado de Resurrección, ponen a flote "**La Verdad**". Se trata de una barca de 775 toneladas con 40 metros de eslora en la cubierta, 9 de manga, 4,87 de puntal, palo mayor de 40 metros de altura, el trinquete llevaba aparejo de cruz con cangreja y escandalosa en la mesana, diseño don Sebastián Arocena (Figura 1)".

Al siguiente año, el 12 de agosto de 1873, el periódico La Voz de Cuba recoge: *"La barca* ***La Verdad*** *tiene una magnífica máquina para hacer una pipa diaria de agua dulce; una hermosa bomba de incendios y también dos regulares cañones para su defensa"*.

Basándonos en un viaje en concreto: la salida del velero «**La Verdad**» en el año 1882 para Cuba desde el puerto de Santa Cruz de La Palma con 398 pasajeros, vamos a poder saber qué medidas preventivas solían tomar las autoridades insulares en los instantes previos a la salida de las embarcaciones, así como otros aspectos no menos sugestivos y digestivos: tipo de alimentación de los emigrantes, procedencia de los pasajeros, número por tonelada, etc.

La primera visita de inspección al velero «**La Verdad**» es la del licenciado en Farmacia don Blas Hernández Carmona, que de puño y letra certifica haber «... reconocido con la minuciosidad que el caso requiere el botiquín que existe a bordo...», reuniendo todas las condiciones que la ley exige. La siguiente visita de inspección es la del teniente-alcalde del

Ayuntamiento de La Palma, por delegación expresa del alcalde, y tiene por cometido saber si el buque lleva a bordo la cantidad de víveres y agua suficiente en razón del número de pasajeros y personas de la tripulación del mismo. . . ».

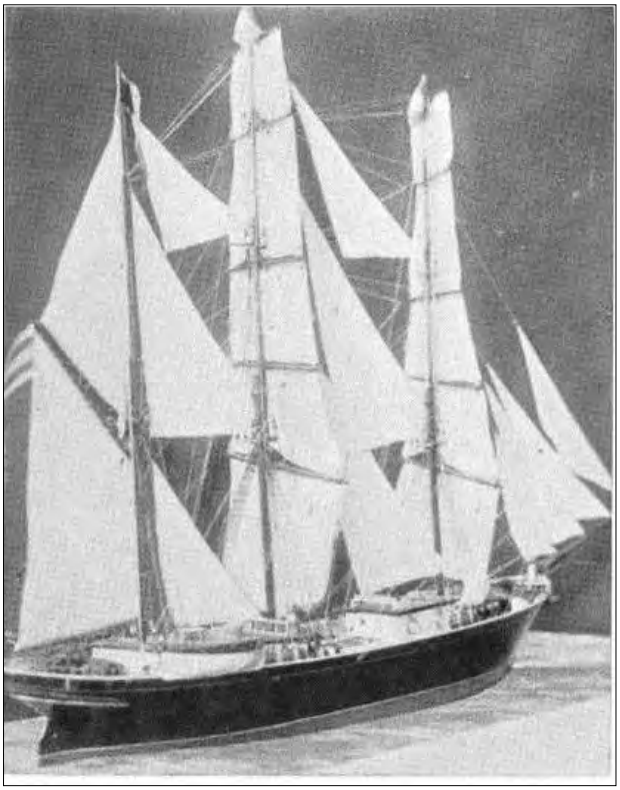


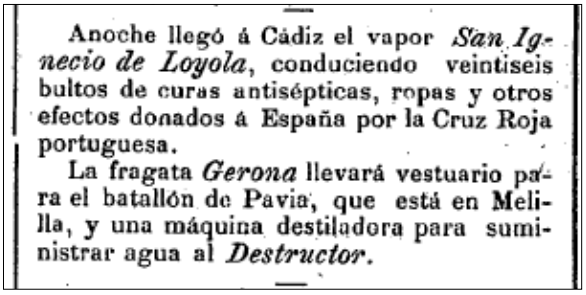
Figura 1.- Maqueta velero La Verdad

Esta inspección de la autoridad municipal nos brinda la preciosa oportunidad de conocer por vez primera la cantidad y calidad de alimentos que para el mes de travesía se introdujeron a bordo del velero «**La Verdad**»:

"150 pipas de agua y un condensador para hacer agua dulce*; 20 barriles con 2.000 Kgs. de carne de vaca; 6 barriles con 600 Kgs. de carne de puerco; 1 barril con 100 Kgs. de mondongo; 300 Kgs. de manteca de puerco; 4.000 huevos; 8 docenas de gallinas; 2 sacos de café con 160 Kgs.; 3 sacos de azúcar con 560 Kgs.; 80 fanegas de gofio; 12 cajas de fideos con 120 Kgs.; 20 sacos de frijoles negros con 2.000 Kgs.; 5 sacos de frijoles blancos con 500 Kgs.; 20 sacos de garbanzos con 2.000 Kgs.; 25 sacos de arroz con 2.500 Kgs.; 2 sacos de almendras; 40 botijas de aceite de 5 litros cada una; 4 pipas de vino; 2 cuarterolas de vinagre; 2 cuarterolas de aguardiente de caña; 2.500 Kgs. de pescado en salmuera; 3 garrafones de vino de gloria; 2 barriles con 8 docenas de cerveza; 2 garrafones con 35 litros de ginebra; 2 garrafones con 35 litros de anizado; 4 barriles con 100 Kgs. cada uno de harina de trigo; 150 Kgs. de higos pasados; 150 Kgs. de queso; 15.000 Kgs. de papas; 4.600 Kgs. de boniatos; 1.000 Kgs. de ñames; 3 fanegas de maíz; 5 Kgs. de té; 2 Kgs. de canela; 6 Kgs. De especies varias; 10 Kgs. de cominos; 2 Kgs. de azafrán; 50 Kgs. de ajos; 200 Kgs. de cebollas; 6 fanegas de sal; 25 ristras de pimientas; 60 calabazas (2.760 Kgs.); 10 docenas de coles cerradas; 50 Kgs. de tomates; 10 Kgs. de orégano; 3 Kgs. de petróleo luz diamante; 6 Kgs. de velas de esperma; 12 docenas de cajas de cerillas; 2 toneladas de carbón mineral; 3 toneladas de carbón vegetal; 23 Kgs. De jabón; 10 rollos de tela para vendajes 200 Kgs. de bacalao; 6 jamones; 57 Kgs. de pimiento dulce; 40 Kgs. de mantequilla; 6 botijas con aceitunas; 2.000 Kgs. de galletas; 50 Kgs. de chocolate; 4 ¿ de sardinas prensadas; 1 lata de carne de conserva; 2 garrafones de melado: 35 litros."*

Estos víveres estaban destinados a la alimentación de 398 pasajeros: 294 varones, 99 hembras y cinco sin especificar, aparte de la tripulación. Procedían de *La Palma* (112), *de Tenerife* (157), *La Gomera* (112), de *Gran Canaria* (11), todos ellos de Telde. Finalmente de F*uerteventura, 1.* A la vista de este listado de alimentos no extraña la necesidad de un aparato destilador a bordo.

Unos años más tarde, en 1893, en un periódico de Melilla, aparece la siguiente información (Figura 2):



Anoche llegó á Cádiz el vapor *San Ignecio de Loyola*, conduciendo veintiseis bultos de curas antisépticas, ropas y otros efectos donados á España por la Cruz Roja portuguesa.

La fragata *Gerona* llevará vestuario para el batallón de Pavia, que está en Melilla, y una máquina destiladora para suministrar agua al *Destructor*.

Figura 2.-Melilla 30 de noviembre de 1893

SEGISMUNDO MORET, AÑO DE 1908

En la sesión del Congreso de 16 de octubre de 1908, se debate el proyecto de ley de administración local que presenta el gobierno.

*"Los Diputados que suscriben tienen el honor de proponer al Congreso que al final del artículo 276 se añada el siguiente párrafo: "*En las islas Canarias la Comisión permanente de la Diputación se dividirá en dos secciones independientes con idénticas atribuciones: una para las islas del grupo oriental con residencia en Las Palmas, y la otra para los del grupo occidental con residencia en Santa Cruz de Tenerife, siendo aplicable a cada una de las dos secciones por adaptación los preceptos de esta ley".

Palacio del Congreso 15 de Octubre de 1908.- José del Perojo.- Pedro del Castillo Olivares.- Benito Pérez Galdós.- Germán Valentín Gamazo.- Felipe Pérez del Toro.- Francisco de Llanos y Torriglia.- Federico Bernaldo de Quirós.

El caso es que después de algunas apasionadas intervenciones, el viernes 16 de octubre de 1908, lo hace el Sr. don Segismundo Moret (en representación del Conde de Romanones que se había ausentado):

....." alguna de aquellas islas que no tienen agua que beber, a pesar de ser islas situadas al medio del mar, faltándoles todavía la aplicación de esas máquinas que van a bordo de los buques, para cuando se acabe el agua potable destilar el agua del mar de modo que pueda utilizarse para la alimentación. Y siendo esto así, yo pregunto: ¿cómo se van a sumar en dos o tres aspiraciones y hacer dos agrupaciones distintas?".

Este aparente galimatías, refleja el argumento de la escasez de agua de Fuerteventura, Lanzarote y El Hierro; como razón para oponerse a la división de la Diputación de Canarias en dos secciones distintas, a las que pertenecerían islas que compartían un mismo problema (aspiración) a resolver. Acta del Congreso de los Diputados correspondiente al día 16 de octubre (1908).

EL MARQUES DE COMILLAS, AÑO DE 1921

El enemigo más implacable en Marruecos era la falta de agua. La gran matanza de 1921, cuando el desastre de Annual, más que las balas rifeñas la ejecutó la sed. Don Claudio, Marqués de Comillas se adelantó a todo, incluso al mismo Gobierno, para buscar solución a un problema tan de vida o muerte. Regalo suyo fueron los diez primeros tanques automóviles que tuvo nuestro Ejército de África. No contento con esto, ordenó a los ingenieros que tenía en sus Empresas estudiaran máquinas destiladoras para instalar en las posiciones. Y todavía más; mientras las estudiaban, envió miles de barricas que sirvieran de aljibes.

Su política africanista le llevó a ser además el factor más importante de la industria y del comercio en nuestras colonias, del prestigio español ante los indígenas y de la resistencia a las ambiciones extranjeras.

Desde 1884 España poseía en el Sahara un buen trozo de territorio, de gran porvenir para la Patria, pero que por desidia del Estado estaba inculto, casi abandonado y en peligro de caer en manos extranjeras. No podía llevarlo en paciencia, y de acuerdo con el Gobierno fundó allí la factoría que fue base de la actual Villa Cisneros.

Puede decirse que por mucho tiempo la soberanía española no tuvo allí otro representante que el marqués de Comillas.

ANDRES COLL AÑO DE 1933

En 1961, John F. Kennedy decía: "*si algún día conseguimos obtener agua dulce del agua salada de forma competitiva y barata esto redundaría en el bienestar a largo plazo de la humanidad de tal modo que empequeñecería cualquier logro científico*".

Pero mucho antes, en 1933, Andrés Coll, arcipreste de Málaga del grupo de deportados que el buque de la marina de guerra, España 5, llevaba a la antigua colonia española de Rio de Oro en 1932, recoge en un libro titulado " Villa Cisneros " una serie de estudios realizados por los intelectuales que le acompañan en su exilio. Así el de Higiene y Sanidad en Villa Cisneros, obra del doctor en medicina D. Adolfo Gómez Sanz nos relata:

" ¡El agua ! He aquí el problema de mayor importancia en Villa-Cisneros; toda la que se necesita para el consumo de la población hay que traerla en aljibes desde Canarias; y si en tiempos normales basta para las necesidades de la población fija-hablamos solo de la europea-en el momento en que escribo estas líneas, es notoriamente insuficiente, ya que la población se ha aumentado con la llegada de los 138 deportados, y en cambio la dotación de agua sigue siendo la misma : 116 toneladas mensuales, que el Gobierno de la República no ha creído necesario aumentar; no hay un sólo manantial, ni un sólo pozo en toda la Península de agua, no ya potable, sino ni siquiera capa de servir para los usos domésticos: los pozos actualmente abiertos no son más que filtraciones de agua del mar, hasta el punto tal que uno de los oficiales del Fuerte me decía: " Que les bastaba mirar al pozo, que existe en el gran patio para saber si la marea estaba alta o baja"; tal es la amplitud de comunicación, que existe entre el mar y el pozo, alejado de él un centenar de metros; y que se explica sobradamente por la estructura porosa de la mayoría de las rocas, que forman el subsuelo y que son en general aglomeraciones conchíferas y madrepóricas. Bien merecería la pena hacer investigaciones en busca de posibles alumbramientos de aguas, aun cuando solo sirvieran para usos domésticos, ya en la misma Península, o fuera de ella, en el Continente; y ensayar procedimientos para la destilación de las del mar, valiéndose de estaciones auto-destiladoras, fáciles de instalar aquí, donde se pueden ocupar extensiones

inmensas, ahora totalmente improductivas y aun disponiendo grandes aparatos destiladores, como existen, según parece, en Cabo Juby, aun cuando fuera solamente como medio supletorio.

El agua traída de Canarias en aljibes y bidones se almacena en tres grandes cisternas, de las cuales una situada en el Puerto, recibe el agua de los barcos; y desde allí, mecánicamente, se envía a las otras dos, situadas en el Campamento y de las cuales en tiempo normal, se surte, no sólo la colonia europea, sino también el poblado moro, que alcanza un censo de 580 habitantes: resulta, pues, un consumo de agua por habitante de cinco litros diarios escasamente, que ahora queda reducido a cuatro por el aumento de los 138 deportados, cantidad como se ve, a todas luces insuficiente. Es cierto y nos apresuramos a confesarlo, que la colonia europea dispone habitualmente de mayor cantidad de agua, pero es por el reducidísimo consumo, que de ella hacen los habitantes del poblado moro.

No se emplea que sepamos, procedimiento alguno de purificación de las aguas potables, salvo el de sedimentación espontánea, útil sólo para eliminar, aunque no por completo, los corpúsculos en suspensión."

Mientras, "Ideas para transformar la hidrología de Villa - Cisneros; del Capitán de Ingenieros D. Miguel Morlán. Dice así:

"Todos sabemos que el agua de mar se puede destilar y así se hace en los barcos de guerra, sobre todo: pero ¿a qué precio? No tenemos a mano datos fehacientes, ni libros de consulta, pero si la memoria no es infiel, hemos oído hablar de unas veinte pesetas el metro cúbico de agua aprovechable. Pero aunque rebajásemos este precio a la cuarta parte, a cinco pesetas, ni aún así sería admisible este proyecto, por costoso, para poder dedicar el agua a usos agrícolas e industriales. Es necesario, por tanto, renunciar a este procedimiento".

Otro medio, ya experimentado con resultados favorables, es poner agua de mar en cajones, cubiertos con placas de cristal en plano inclinado y una canal en la parte baja de la placa de cristal, a cuya ranura o canal va acoplado el cuello de una botella. Durante el día el sol evapora el agua del recipiente y durante la noche este vapor condensa en el cristal y corre a lo largo de la placa y canal, para caer dentro de la botella. Por este procedimiento se obtendrán unos tres litros por metro cuadrado de superficie en este clima. Calculando ahora en cincuenta pesetas el valor de cada metro cuadrado fabricado, si la producción se hace en serie, y poniendo el 7 % de interés, entretenimiento y amortización del capital empleado, resultan 3,50 al año. En ese año se recogería 1 metro cúbico de agua. A este valor del agua conseguida habría que añadir y por tanto habría que rebajar de los gastos el valor de la sal, que quedaría como sedimento. Este sistema es el que se emplea en las Nitrerías de Chile y allí podrían adquirirse datos fijos sobre gastos y producción.

Otro proyecto podría ser hacer hervir el agua del mar, pero no calentándola a más de 100º como se hace en los barcos, sino por medio del enrarecimiento del aire. El agua del mar tiene aquí temperatura de más de veinte grados; por tanto, disminuyendo la presión atmosférica, llegaría a hervir; y después pasando los vapores a un condensador, enfriando con agua de mar ya fría, como se encuentra en capas más profundas, obtendríamos agua destilada.

El procedimiento es similar a la experiencia que hizo Claude en Matanzas; habiendo fracasado esta experiencia, porque el francés Claude esperaba y perseguía por este procedimiento obtener energía eléctrica, valiéndose de la diferencia de temperatura de las distintas capas de agua en el mar: y resultó que la obtuvo, pero toda la obtenida y más aún, no era suficiente para mover el mecanismo, que necesita una fábrica de energía eléctrica. Pero el fracaso, no del proyecto, sino de su adaptación y aplicación, podrían ser muy útiles a

fines distintos y Mr. Claude poseerá seguramente datos precisos sobre la ebullición del agua del mar a débiles presiones.

Ahora bien, renunciando a las pretensiones ambiciosas de Claude y aprovechando la energía del viento; y limitándonos a obtener agua destilada, podría intentarse la experiencia. Bien valdría el costo de un ensayo el estudio y solución de tan interesante y beneficioso problema.

Cabe aquí recordar al ingeniero estadounidense Norbert Rillieux (primo del pintor Edgar Degas). Quién en 1846 obtiene la US PATENT 4879 para su evaporador de tres efectos fabricado el año anterior. Fue la gran revolución en la industria azucarera. La aplicación de la bomba de vacío a fin de concentrar el jugo de la caña.

Y pasando de lo dulce a lo salado, Rillieux nos ayuda a explicar las frases anteriores de D. Miguel Morlán: " ...sino por medio del enrarecimiento del aire ", "...ebullición del agua del mar a débiles presiones " El vacío baja la temperatura de ebullición del agua de mar hacia la mitad. Con el consiguiente ahorro de energía aplicada. En el año 2001, Ghassan Ejjeh, presidente de International Desalination Association (IDA) da la conferencia titulada " Desalación una nueva fuente de agua disponible". Durante la misma dice: *"Los esfuerzos para mejorar la eficiencia de evaporación en la producción de azúcar de caña desde los jugos de caña (guarapo) llevan a un gran avance en la utilización de la energía en los procesos de de desalación a partir de 1.840"*

EOLO DIOS DE LOS VIENTOS....

La fragata Minador Eolo F–21 (Figura 3) comenzó su construcción el 23-2-1938, en plena guerra civil. Fue botado en agosto de 1939, entregado a la flota en noviembre de 1941 con el numeral 28; que más tarde cambiaría por el de F - 21 y finalmente dado de baja en febrero de 1972. Tenía capacidad para unas 70–90 minas y una desaladora de evaporación-destilación de 30.000 litros/día. Disponía de un tanque de almacenamiento de 40 toneladas de agua dulce.Como vemos, la desalación en España también se utilizó en los barcos movidos a vapor a fin de reponer agua de calderas.

Figura 3.-Fragata-Minador F-21 EOLO, años 1953-55.

El Eolo estuvo en la guerra de Ifni (1957-58), quedando durante un tiempo destacado en la Base Naval de Canarias (Las Palmas de Gran Canaria), integrado en el 4º Grupo de escoltas.

QUEEN MARY, AÑO DE 1967

En 1934 pusieron a flote al Queen Mary (Figura 4). Llevaba un evaporador de triple efecto de 200 m^3/día fabricado en cuproniquel y usaba cloruro férrico como antiescalante. Fue el mayor en aquel momento.

Figura 4.- QUEEN MARY. Puerto de La Luz, año de 1967.

REFERENCIAS

Birkett, J. (2001).*The history of desalination before large scale use.* Encyclopedia of Desalination and Water Resources, Vol. 1 Ed. DESWARE.

Coll, A. (1933). *Villa Cisneros.* Higiene y sanidad en Villa-Cisneros (79-81). Ideas para transformar la Hidrología de Villa-Cisneros (89-94). Ed. Librería general de Victoriano Suárez, 187 pp.

Congreso de los Diputados (1908). *Acta* del día 16 de octubre de 1908.

Diaz Lorenzo, J.C. *blogspot*

Hurtado de Mendoza y Pérez Galdós, A. (1910). *Perojo y la División.* Ed. Librería Gran Canaria.322 pp.

Purchass's *Colection of Voyages* B. VII. Cap. 7

Sosvilla, M. *blogspot*

ISBN: 978-84-938046-4-0

EL AGUA REGENERADA Y LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES

María del Pino PALACIOS-DIAZ[1], Vanessa MENDOZA-GRIMÓN[1], Idaira HERNÁNDEZ BRITO[2], Juan Ramón FERNÁNDEZ-VERA[2] y José Manuel HERNÁNDEZ-MORENO[3]

[1] Departamento de Patología Animal, Producción Animal y Ciencia y Tecnología de los Alimentos. Grupo investigación GEOVOL. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 35413 Las Palmas de Gran Canaria, España, v.mendozagrimon@ulpgc.es
[2] Laboratorio agroalimentario y fitopatológico del Cabildo de Gran Canaria, Arucas, España
[3] Departamento de Biología Animal, Edafología y Geología, jhmoreno@ull.es

RESUMEN

La *Jatropha curcas* L., una especie tóxica que no interfiere en la cadena alimentaria, produce biodiesel de mejor calidad ambiental que los aceites de origen mineral pero, para su cultivo, se emplean recursos limitados, fundamentalmente agua y suelo. Por tanto, en las zonas áridas es necesario cultivarla en condiciones intensivas, regando con aguas regeneradas y disminuyendo los costes productivos. Para optimizar el consumo del agua se ha empleado el riego alterno de raíces, que mantiene seca una parte del sistema radicular (empleado con éxito en otras oleaginosas), obteniéndose menos frutos/racimo pero más racimos fértiles/árbol, lo que permitirá estrechar el marco de plantación, una de las pocas opciones para mejorar su rentabilidad pues la producción por árbol es muy estable (1.25 kg semilla/árbol para los mejores árboles de esta experiencia, con óptimos clima y suelo y sin limitación en el uso del agua). Un elevado porcentaje de frutos caídos en el suelo (24%) y una producción escalonada (salvo en algunos ejemplares) dificultan enormemente su mecanización. Con el consumo hídrico calculado (15.5 m^3 agua/ L de aceite obtenido) es muy difícil que este cultivo sea rentable si no se tienen en cuenta los beneficios ambientales, económicos y sociales asociados.

Palabras clave: consumo hídrico, riego alterno raíces, biodiesel, *Jatropha curcas*, riego por goteo enterrado

ABSTRACT

Jatropha curcas L., toxic species that does not interfere with the food chain, produces biodiesel with better environmental quality than mineral oils. Despite of this, for its cultivation in a sustainable way, it is necessary to optimize the limited resources used, mainly water and soil. Therefore, in arid areas is necessary to cultivate in intensive conditions, irrigating with reclaimed water and reducing production costs. For optimizing water consumption, partial root-zone drying (PRD) that keep dry part of the root system (used successfully in other oil crops) has been used, yielding less fruit / bunch but more fruit bunches/plant, which allows for establishing a narrower framework plantation. This is one of the few options for improving profitability as production per tree is very stable (1.25 kg seed/plant to the best trees of this experience, with excellent climate and soil without limitation in the use of water). A high

percentage of fruit lying on the ground (24%) and a stepped fruit production (except in some specimens) greatly hinder its mechanization. Calculated water consumption (15.5 m^3 water/L oil) makes very difficult to consider this crop as profitable one when environmental, economic and social benefits associated are not taken into account.

Key words: water consumption coefficient, partial root-zone drying (PRD), biodiesel, *Jatropha curcas*, subsurface drip irrigation (SDI)

INTRODUCCIÓN

El cultivo de *Jatropha curcas* L., una especie que por su toxicidad no interfiere con la cadena alimentaria, puede proporcionar combustible renovable para el sector del transporte, sector que supone un tercio del consumo de la energía en España (MIET, 2010). Pero, para ofrecer una solución sostenible, debe utilizar recursos de agua no convencionales, evitando competir tanto por el "agua verde" (precipitación efectiva), como por la "azul" (agua superficial y subterránea). El suelo, un recurso limitado y no renovable, representa el otro factor productivo que debe optimizarse si se quiere ofrecer una solución ambientalmente favorable. Por tanto, el cultivo intensivo de esta especie utilizando aguas regeneradas y técnicas de riego optimizadas es la única opción productiva que puede plantearse en los países desarrollados. Existe poca información sobre cómo abordar su cultivo bajo estas condiciones pues su gran variabilidad genética (Yi et al, 2014), dificulta la realización de este tipo de estudios, aunque algunas publicaciones recientes ya aportan información sobre su respuesta al riego por goteo con aguas regeneradas (De Miguel et al, 2013 y Dorta-Santos et al, 2014) en condiciones de aridez.

Estudios de coste-beneficio cifran los costes productivos de *J. curcas* entre 3 y 10 veces los ingresos generados por la venta del diesel utilizando las prácticas culturales de los países en vías de desarrollo (De Miguel et al, 2013). Por tanto, reducir estos costes es fundamental, no encontrándose en la bibliografía estudios de costes en producción intensiva. Pero además, en un análisis global se deben introducir los beneficios ambientales (los materiales particulados son un 80% inferiores que las que producen los combustibles de origen mineral (Makkar and Becker, 2009)), las emisiones de carbono se reducen, la erosión de suelos abandonados se frena, etc.) y económicos (los recursos financieros y la actividad económica se emplean y generan en el país de origen, disminuyendo el déficit comercial).

Las técnicas de riego alterno (partial root-zone drying, PRD) desarrolladas en los años 90 en Australia demostraron tres beneficios: incrementar la eficiencia en el uso del agua sin disminuir los rendimientos, reducir del crecimiento vegetativo (mejorando el balance reproductivo/vegetativo) y una mejora en la calidad de la fruta (Dry et al., 1996; Loveys et al., 2000). Aunque no existen estudios que analicen la respuesta a PRD en *Jatropha curcas*, los resultados obtenido para otra oleaginosa, el olivo, explicables por el mejor cierre estomático cuando se utiliza PRD (Wahbi et al., 2005), permiten pensar que es posible obtener un incremento en su rendimiento de aceite (Aganchich et al., 2008).

En este artículo se aborda la viabilidad del empleo de una técnica de manejo del riego (PRD) que mejore la productividad del agua, proporcionando datos que permitan avanzar en el estudio de la viabilidad económica del cultivo de *Jatropha curcas.*

METODOLOGIA

Diseño experimental y descripción del sistema de riego.

Para esta experiencia se ha utilizado una plantación de *Jatropha curcas,* implantada hace

5 años en los terrenos de la Granja Agrícola Experimental del Cabildo de Gran Canaria, con un marco de plantación de 3 m entre los pasillos y 2.5 m entre los árboles. A principio de febrero de 2014 se procede a una poda de formación con motosierra, dejando los árboles a una altura de 1.30 m y un diámetro de copa aproximado de 0.75 m. Posteriormente se procede a una plantación de nuevos ejemplares en los antiguos pasillos, quedando a una distancia de 1.5 m entre árboles y dejando pasillos de 2.5 m. A finales de este mismo mes se instala un sistema de riego enterrado a 0.2 m de profundidad, sustituyendo el anterior riego por goteo superficial. Un fuerte ataque de cochinilla obligó a aplicar dos tratamientos fitosanitarios, utilizando aceite de verano. No se observaron más plagas o enfermedades por encima del umbral de tratamiento. El suelo de la parcela se clasifica como Anthrosol (ISSS/ISRIC/FAO, 1998) o Torriarent (Soil Survey Staff, 1998). La finca cuenta con una estación meteorológica automática, con datos disponibles desde el 2000. En este periodo del 2014, solo se dispone de datos de precipitación de 5 meses (abril a agosto), en los que el valor acumulado es bajo, no distinguiéndose la media del 2000 al 2014 (26.6 L/m^2) de los 22.7 L/m^2 recogidos,en este periodo, mientras que precipitan anualmente 196 L/m^2. La parcela, de 248 m^2, se dividió en tres bloques en los que se aplican los dos tratamientos: un tratamiento control (Tc), que consiste en aplicar una dosis diaria de 2.6 L/m^2 y un segundo tratamiento (Ta), que recibe la misma dosis de riego pero semanalmente de forma alterna, a cada lado de los árboles. En cada bloque se riega una línea de árboles por tratamiento, por lo que cada tratamiento riega 3 líneas de cinco árboles cada una, con 12 goteros/árbol.

Para la aplicación del agua regenerada se utilizó un sistema de riego enterrado (SDI) con goteros integrados autocompensantes, antidrenantes y con mecanismo antisifón separados a 0.5 m y con un caudal nominal de 2.5 L/h. Las líneas de riego se encuentran separadas a 1.2 m, dejando los árboles en el centro. Se ajusta el tiempo de riego para aplicar una dosis constante que se aproxime a la evapotranspiración (ET_0) media del periodo. Así, se dan dos riegos al día, con una duración en cada riego de 20 minutos para el Tc (las dos líneas riegan el mismo árbol simultáneamente) y 40 minutos para el Ta, pero solamente a una de las líneas que riega cada árbol (secado parcial de las raíces, "PRD" siglas en inglés). Cada subunidad de riego consta de un caudalímetro, cuya lectura se realiza semanalmente.

Análisis del suelo, foliar y parámetros productivos.

Se tomaron muestras compuestas entre 0 y 0,2 m de profundidad, coincidiendo con el principio de la experiencia. Las muestras se tomaron a 0.2 m del tronco de los árboles (en el bulbo húmedo, loc 1), entre dos árboles de cada una de las líneas (loc 2) y en los pasillos (loc 3). Para la determinación del carbono orgánico (CO, en %) y el nitrógeno total (N tot, expresado en %) se utilizó la técnica de combustión seca con un analizador LECO CNS 2000. Las sales solubles se estimaron por la conductividad eléctrica (CE, en dS/m) 1:5. El nitrato (expresado en mg/kg disponible se determinó por la extracción con cloruro cálcico 0.01 M, para posteriormente ser analizados por cromatografía iónica. El fósforo (P, expresado en mg/kg) disponible se determinó según el método de Olsen y Sommers (1982). Los cationes intercambiables se extrajeron con una solución de acetato amónico tamponada a pH 7. Los cationes extraídos (expresados en meq/100 g): potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y sodio (Na) se analizaron por espectrofotometría de emisión óptica (ICP_OES). Se tomaron muestras compuestas de las hojas jóvenes de cada una de las líneas de árboles. Se determinó el N (expresado en %) mediante la técnica de combustión seca en LECO CNS 2000. Para el resto de elementos analizados P, K, Ca, Mg, Na (expresados en %), B, Cu, Fe, Mn y Zn (expresado en mg/kg), se utilizó la técnica de digestión con ácido nítrico en el microondas, para su posterior análisis por ICP_OES.

Se recolectan semanalmente los frutos maduros de cada uno de los árboles de los diferentes tratamientos y los frutos encontrados en el suelo. En campo se cuentan: el número de frutos maduros por racimo y el número de racimos con frutos maduros, para

cada árbol en cada recolección. Con los datos obtenidos se calculan: el número de frutos recolectados por árbol, a los que añadiendo los frutos caídos se obtienen los frutos totales. En el laboratorio, para cada árbol y en cada recolección, se pesan los frutos maduros y sus semillas. Además, para cada árbol se calculan las nuevas variables: número de frutos por racimo y producción acumulada de semillas a lo largo del tiempo.

Análisis estadístico.

El análisis estadístico se realizó mediante el programa SPSS (versión 22) por los procedimientos de Modelo Lineal Generalizado, tomando como variables dependientes el tratamiento (riego alterno y control), la fecha de recolección y el árbol, e incluyendo el análisis de los siguientes parámetros productivos: el número de frutos por racimo, el número de racimos con frutos maduros por árbol (racimos fértiles/árbol), el número de frutos maduros totales (que incluye los frutos caídos) y el nº de frutos recolectados en la copa/ árbol, el peso de la producción obtenida, tanto para frutos como para semillas (expresada en g /árbol), y la dosis de agua aplicada (Tc y Ta) y su interacción. La media de la separación fue probada usando la diferencia menos significativa (LSD), teniendo en cuenta un nivel de significación α= 0.05. Además se estudiaron los resultados para la variable producción acumulada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Jatropha es una especie que tolera aridez pero, si no dispone de agua suficiente la producción no es posible. Necesita un mínimo anual de 500-600 L/m^2 para tener una floración y cuajado adecuados (Behera et al., 2010). Así que, como en todas las regiones semiáridas, los 196 L/m^2 anuales son insuficientes y es imprescindible recurrir al riego (Maes et al., 2009), pues para cosechar una producción aceptable sin riego se necesita una precipitación anual entre 1000-1500 L/m^2 (FACT, 2007). La cantidad de agua suministrada durante el periodo experimental fue de 2.6 (L/m^2 día^{-1}), midiéndose un consumo a partir de las lecturas de los caudalímetros de 680 L/m^2. Los valores de la cantidad de agua utilizada se comparan con los de la ET_0 anual del periodo entre febrero y noviembre del 2014, que es similar a la ET_0 anual media (961 mm frente a 1015 mm), aunque algo inferior en los meses de verano y otoño 2014 (Figura 1). La dosis aplicada (suponiendo que no existe precipitación) aporta entre el 65% y el 110% de la ET_0

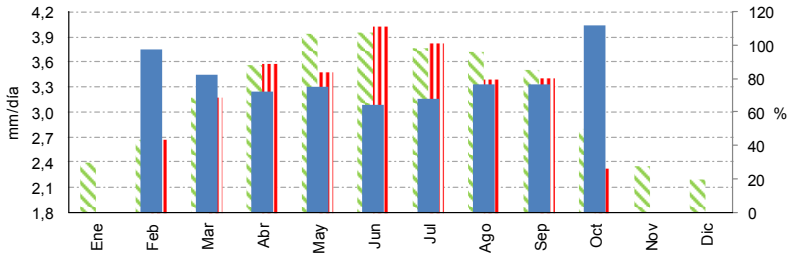


Figura 1: ET_0 media (verde), ET_0 del periodo experimental 2014 (rojo) y agua aplicada / ET_0 (azul).

Respecto a la respuesta a los factores climáticos, en el periodo de datos disponible el promedio de las temperaturas mínimas diarias superó siempre los 10ºC. Por tanto, las temperaturas fueron acordes con las óptimas para el crecimiento del cultivo (20-28ºC, FAO, 2010).

En la Tabla 2 se presentan los resultados de las muestras de suelo. Existen diferencias significativas en casi todos los parámetros en función del lugar de muestreo. En loc 1 se observa una significativamente superior basicidad y contenido en Ca y Na e inferiores salinidad, MO, relación C/N, P, K y Mg. También, y aunque no significativas, los valores de nitrato son inferiores en el bulbo, lo que se explica por la mayor absorción de nutrientes por parte de las raíces que crecen preferentemente en esa zona. Por tanto, el suelo mayoritariamente explorado por las raíces tiene un carácter básico, no presenta problemas de salinidad y tiene un alto contenido en MO, con un carácter muy estable.

Tabla 2. Valores de pH en agua (1:2.5), conductividad eléctrica 1:5 (CE, en dS/m a 25ºC), caliza, materia orgánica (MO, expresado en %), nitrógeno total (N tot, expresado en %), nitrato (expresado en mgN/kg disponible), fósforo Olsen (P, expresado en mg/kg), Los cationes extraídos (expresados en me/100 g): potasio (K, calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na), para las tres localizaciones del muestreo: 1, bulbo húmedo, 2 entre líneas, 3 entre pasillos.

		pH		CE		caliza		MO		Ntot		C/N		Nitrato		P		K		Ca		Mg		Na	
		med	std	med	std	med	std	med	std	med	std	med	std	med	std	med	std	med	std	med	std	med	std	med	std
loc	1	8,52^{c}	0,04	0,31^{a}	0,09	5,05^{a}	0,17	5,29^{ab}	0,18	0,33^{a}	0,01	9,38^{a}	0,16	109,18^{a}	136,86	53,42^{a}	4,38	4,47^{a}	0,26	24,80^{c}	0,48	7,54^{a}	0,12	3,35^{b}	0,19
	2	8,37^{b}	0,04	0,51^{a}	0,09	5,91^{b}	0,19	5,66^{b}	0,20	0,34^{b}	0,01	9,78^{ab}	0,18	384,61^{a}	151,62	65,06^{a}	4,85	8,40^{b}	0,29	22,92^{b}	0,54	9,33^{b}	0,13	2,58^{a}	0,22
	3	8,11^{a}	0,05	1,08^{b}	0,10	5,87^{b}	0,21	4,87^{a}	0,22	0,29^{b}	0,01	9,97^{b}	0,20	1261,05^{b}	167,62	64,64^{a}	5,37	8,93^{b}	0,32	21,25^{a}	0,59	9,1^{b}	0,14	3,2^{b}	0,24

Respecto a los parámetros en hoja, sólo en el caso del Na^{+} las plantas del Ta presentan contenidos significativamente superiores que las del Tc. Se observa que las plantas de este estudio tienen un contenido en macro nutrientes en el mismo rango que otros autores (Figura 2). En este sentido, Dorta-Santos et al. (2014) citan que, con sus contenidos de nutrientes en hoja joven, no se producen limitaciones que afecten a la productividad. Sin embargo, el contenido de K aquí obtenido es inferior al mencionado por Dorta-Santos et al. (2014) y Souza et al. (2011) y puede relacionarse con un progresivo agotamiento del K del suelo en la zona del bulbo húmedo (Tabla 2), en la que no se realizó abonado. Es destacable que Dorta-Santos et al. (2014) encontraban que los parámetros de suelo con mayor influencia en la producción de semillas eran el P y el K, por lo que, y dada la riqueza en P del suelo, habría que revisar la conveniencia de proceder a un abonado potásico.

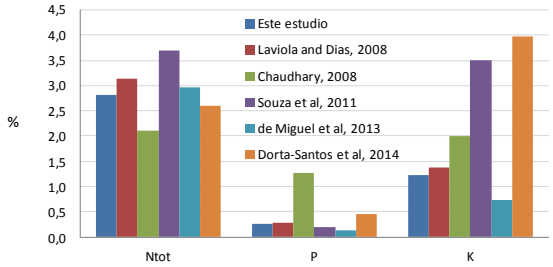


Figura 2: Contenidos de macro nutrientes en hoja (en %) obtenidos en el presente estudio y los presentados por otros autores.

Analizando los resultados para la variable árbol se observa que se presentan diferencias significativas para el número de frutos/racimo. Este resultado coincide con los obtenidos por Heller (1996) y Yi et al. (2014), que encontraron diferencias cuando analizaron diversas poblaciones de Jatropha, aunque el rango de variación que mencionaron (0.2-9 y 6.6-12.3, respectivamente) es muy superior al encontrado en los árboles de esta parcela. También se observan diferencias significativas en el número de racimos fértiles/árbol (parámetro para el que Yi et al., (2014) no encontraron diferencias). A estos dos parámetros hay que añadir el número de frutos/árbol, cuyas diferencias también resultan significativas, coincidiendo de nuevo con lo encontrado por Heller (1996), pero en lo que de nuevo Yi et al, (2014) no encuentran diferencias. Por el contrario, el peso medio de los frutos no resulta significativamente distinto entre los árboles, resultado que también coincide con el obtenido

por Heller (1996), aunque en su caso el peso medio de los frutos (1.52 g/fruto) es muy inferior al obtenido en esta experiencia (4.82 g/fruto).

Cuando se analiza la evolución de estos parámetros respecto a la semana de cosecha (durante 15 semanas), se encuentran diferencias para 4 parámetros: en el número de frutos/racimo (como ocurría para la variable árbol); en el peso medio del fruto (contrariamente a lo obtenido para los árboles); y para los pesos/árbol de los frutos y de las semillas, encontrando mayores producciones entre las semanas 3ª y novena. La gran variabilidad entre árboles coincide con la citada por Yi et al, (2014), que mencionan que la falta de uniformidad dentro de las poblaciones es uno de los principales problemas para planificar la producción comercial de Jatropha. Así, las diferencias entre árboles son tan marcadas que es difícil observar los efectos de las prácticas de manejo que se pretende estudiar. A pesar de ello, en este estudio se ha encontrado diferencias entre Ta y Tc para dos parámetros, el número de frutos por racimo y el número de racimos con frutos por árbol. Aunque el Ta presenta significativamente menos frutos/racimo que el Tc (2.5 frente a 3.05 respectivamente), no se obtiene diferencias significativas en el peso de los frutos recolectados. Este resultado coincide con el obtenido por (Wahbi et al., 2005), quienes encontraron menor número de frutos de aceituna aunque de tamaño ligeramente superior con PRD. Además, Ta tiene una media significativamente superior (14.88 racimos fértiles/árbol) frente a Tc (11.77). Este hecho explica que se compense el menor número de frutos por racimo, obteniéndose una producción total equivalente. Este resultado es prometedor pues permite pensar que, cuando se incremente la densidad de plantación, los árboles regados con el riego alterno serán capaces de mantener su productividad pese a contar con menos espacio ya que tienen mayor número de ramas fértiles/árbol. Esta mejora en el balance entre crecimiento vegetativo y el desarrollo reproductivo se obtuvo ya en los primeros estudios de PRD en cultivos de viña (Dry et al., 1996; Loveys et al., 2000) y es una de las razones que explican la mejora en la eficiencia del agua bajo estos sistemas.

Estudiando los valores medios obtenidos para el resto de los parámetros se calcula un porcentaje de frutos caídos al suelo del 24%. El peso medio de frutos es de 4.82 g, y el peso de la producción obtenida, tanto para frutos como para semillas (148 y 63.66 g/árbol y recolección respectivamente, coincidiendo los 955 g semilla /planta para las 15 semanas con el valor obtenido por Yi et al. (2014) para su variedad mejorada).

En la Figura 3 se presenta la producción acumulada de semillas (expresada en g/árbol), obtenida a lo largo del periodo productivo. Se observa la gran variabilidad entre árboles, ya que entre los menos y más productivos dentro de una misma línea, las diferencias son del 44 y 48 % para Tc y Ta respectivamente.

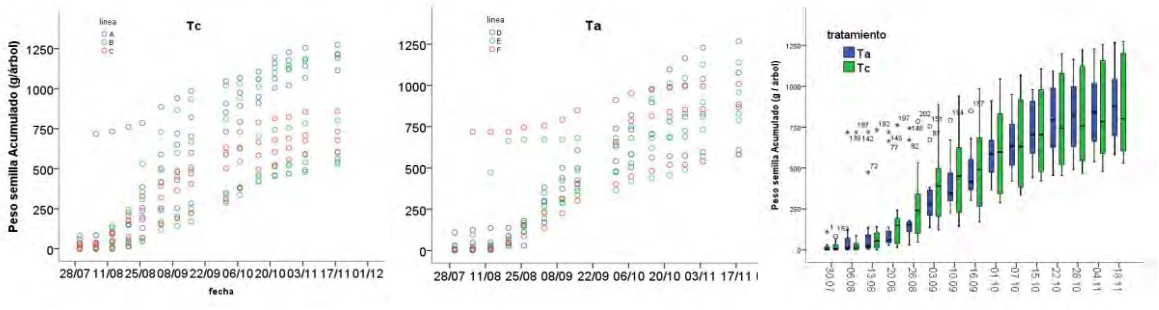


Figura 3a: producción acumulada de semillas a lo largo del periodo de recolección (g/árbol) y 3b: diagrama box-plot de la producción acumulada de semillas para ambos tratamientos

En la Figura 3b se presenta la producción acumulada de semillas para ambos tratamientos. La amplitud de las cajas se corresponde con la marcada diferencia entre árboles de un mismo tratamiento. Pero además, y salvo para algunos ejemplares concretos,

se observa que durante el primer mes la cantidad recogida es muy pequeña y lo mismo ocurre para las últimas semanas. Por otro lado, y pese a que la gran variabilidad entre ejemplares no permite apreciar diferencias significativas entre la producción para Ta y Tc (1177 y 1173 kg/ha respectivamente), producción inferior a los 1875 kg/ha citados por Dehue and Hettinga (2008) y a los citados por Heller et al. (1996), se observa que al principio se recogen menos g de semillas en el Ta pero, a partir de octubre la media del peso cosechado es ligeramente superior. Será necesario comprobar si esta tendencia se mantiene para la próxima recolección. Algunos autores citan que el rendimiento en aceite de las semillas es del 28% (Yi et al, 2014), mientras que Mofijur et al. (2012) citan un rendimiento entre el 55-60% p/p, lo que coincide con el 55-58% obtenido en Canarias, porque expresan el rendimiento en semilla blanca. Tomando como referencia este valor del 35 % v/p, se puede estimar que se producirán 437.5 L aceite/ha. Si tenemos en cuenta los 6800 m^3/ha de agua utilizados, la Jatropha ha necesitado 15.5 m^3 agua por cada L de aceite obtenido. Por tanto, la producción obtenida difícilmente garantizará la rentabilidad para este cultivo. En este sentido, y suponiendo un precio del agua de 0.2 € y 0.7 €/L de aceite, el gasto en agua multiplicaría por cuatro el ingreso obtenido por su venta. Si consideramos la producción de los mejores árboles (1.25 kg/árbol) y suponiendo que se duplica el nº árboles/ha, se obtendrían 1214 L aceite/ha, 5.6 m^3 agua/L de aceite, con lo que el gasto de agua supondría 1,6 veces el ingreso obtenido por la venta de aceite. Sólo a partir de producciones de 5000 kg semilla/ha o si el precio pagado por el biodiesel fuera superior a 0.7 €/kg la producción sería interesante (Rucoba y Munguía (2013) citan un precio de venta de 5$/ kg de semilla, con cuyo valor se garantizaría la rentabilidad). Por tanto, para mejorar la rentabilidad es fundamental disminuir el marco de plantación, incrementando el número de árboles productivos por ha. Queda pendiente comprobar si el contenido en aceite es mayor para el riego alterno, como ocurre en olivos (Aganchich et al, 2008).

CONCLUSIONES

En esta recolección se ha obtenido una producción media de 1200 kg semilla/ha, no respondiendo la productividad de los árboles a la aplicación del riego alterno. Se ha comprobado el efecto de la gran variabilidad genética de las plantas de Jatropha, hecho que dificulta la realización de estudios para la optimización de las prácticas agronómicas. A pesar de ello, algunos parámetros se han visto afectados por el tipo de manejo del agua, presentando menos frutos/racimo pero más racimos fértiles/árbol cuando las plantas se riegan de forma alterna. Por tanto, utilizando el secado parcial de raíces es posible que se pueda incrementar la densidad de plantación manteniendo la productividad/árbol (ya que este manejo proporciona mayor número de ramas fértiles/árbol), incrementando la producción total. De hecho, para que la producción de Jatropha resulte rentable, disminuir el espacio entre árboles es una de las pocas opciones, pues la producción por árbol es muy estable (1.25 kg semilla/árbol en los mejores árboles de esta experiencia con óptimos clima y suelo). Otro de los factores que condicionan la rentabilidad es el gran porcentaje de frutos caídos en el suelo (24%), por lo que es necesario cosecharlos. Salvo en algunos ejemplares, la producción es escalonada a los largo del periodo productivo, hecho que dificulta enormemente su mecanización. Con el consumo hídrico calculado (15.5 m^3 agua por cada L de aceite obtenido) es muy difícil que este cultivo sea rentable si no se tienen en cuenta los beneficios ambientales económicos y sociales asociados.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por Ministerio de Economía y Competitividad. Subprograma de Proyectos de Investigación Fundamental (CGL2012-39520-C03-03).

BIBLIOGRAFIA

Aganchich B. El Antari A., Wahbi S., Tahi H., Wakrim R. and Serraj R. 2008. Fruit and oil quality of mature olive trees under partial rootzone drying in field conditions. Grasas y Aceites 59(3), 225-233

Behera S.K., Srivastava P., Tripathi R., Singh J.P., Singh N., 2010. Evaluation of plant performance of Jatropa curcas L. under different agro-practices for optimizing biomass-A case study. Biomass and Bioenergy 34, 30–41.

Dehue and W Hettinga, 2008. GHG PERFORMANCE JATROPHA BIODIESEL. ECOFYS pp 1-48

De Miguel A. Martínez-Hernández V., Leal M., González-Naranjo V. de Bustamante I., Lillo J., Martín I., Salas JJ., Palacios-Díaz MP. 2013. Short-term effects of reclaimed water irrigation: Jatropha curcas L. cultivation. Volume 50, January Pages 44–51

Dorta-Santos M., Tejedor M., Jiménez C., Hernández-Moreno JM., Palacios-Díaz MP. and Díaz FJ. 2014 Sustainability, 6, 6902-6924; doi:10.3390/su6106902

Dry PR, Loveys BR, Botting D, During H. 1996. Effects of partial root-zone drying on grapevine vigour, yield, composition of fruit and use of water. Proceedings of the 9th Australian Wine Industry Technical Conference 126-131

FACT. Position Paper on Jatropha curcas L. State of the Art, Small and Large Scale Project Development. Fuels from Agriculture in Communal Technology, 2007.

FAO, 2010. Jatropha a Smallholder Bioenergy crop. The potential for Pro-Poor Development, vol.8. FAO, Integrated Crop Management, 1-114.

Heller, J. 1996 Physic Nut. Jatropha curcas L. Promoting the Conservation and Use of Underutilized and Neglected Crops. 1. [Internet Monograph]. Rome: International Plant Genetic Resources Institute, 1996.

Loveys BR, Stoll M, Dry PR, McCarthy MG. 2000. Using plant physiology to improve the water use efficiency of horticultural crops. Acta Horticulturae 537, 187-197

Maes W.H., Trabucco A., Achten W.M.J, Muys B., 2009. Climatic growing conditions of Jatropha curcas L. Biomass and Bioenergy 33, 1481–1485.

Makkar, H.P.S., Becker, K., 2009. Jatropha curcas, a promising crop for the generation of biodiesel and value-added coproducts. Eur. J. Lipid Sci. Technol. 111, 773–787.

Ministerio de Industria, Energía y Turismo, 2010. La energía en España, 2ª ed http://www.minetur.gob.es/energia/balances/Balances/LibrosEnergia/Energia_Espana_2010_2ed.pdf ISBN: 978-84-15280-08-8

M. Mofijurn, H.H. Masjuki, M.A. Kalam, M.A. Hazrat, A.M. Liaquat, M. Shahabuddin, M. Varman. 2012. Prospects of biodiesel from Jatropha in Malaysia. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 5007–5020

Rucoba A. y Munguía A. 2013. Rentabilidad de Jatropha curcas en asociación con cultivos y monocultivo en tierras de temporal de Yucatán. Revista Mexicana de agronegocios. Sexta Época. Año XVII. Volumen 33. Julio-Diciembre

Wahbi S, Wakrim R, Aganchich B, Tahi H, Serraj R. 2005. Effects of partial rootzone drying (PRD) on adult olive tree (Olea europaea) in field conditions under arid climate I. physiological and agronomic responses. Agriculture Ecosystems and Environment 106, 289-301

Yi Ch., Reddy Ch., Varghese K., Thi Ngoc Ha Bui, Zhang Sh, Kallath M., Kunjachen B., Ramachandran S. and Hong, Y. 2014. A New Jatropha curcas Variety (JO S2) with Improved Seed Productivity. Sustainability, *6*(7), 4355-4368; doi:10.3390/su6074355

ISBN: 978-84-938046-4-0

EVOLUCIÓN DEL RECURSO DE DESALACIÓN EN GRAN CANARIA

Carmelo Javier SANTANA DELGADO[1]

[1] Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria. Avda. Juan XXIII, 2, CP 35004, Las Palmas de G.C.
email: carmelo.santana@aguasgrancanaria.com

RESUMEN

No cabe duda alguna que la implantación de la desalación, como recurso alternativo a los recursos convencionales, permitió el desahogo de un modelo hidráulico en estado límite, y supuso el desarrollo y posterior auge del sector turístico, fuente esencial del desarrollo de la isla. La implantación en los 70, partió como necesidad básica en determinados núcleos poblacionales que comenzaban a superpoblarse, comenzando con instalaciones aisladas que fueron referencia mundial. La desalación de agua de mar se ha convertido en una fuente de suministro esencial, principalmente en los municipios costeros, permitiendo el suministro de agua al abasto público de amplios rangos de población, llegando a alcanzar cotas de elevación de más de mil metros de altitud. Por otro lado, no sólo ha permitido el suministro a la población, sino que ha supuesto un recurso que ha dado garantías de continuidad al sector agrícola. También ha sido una técnica de aprovechamiento de recursos convencionales, como el caso de aguas subterráneas salinizadas, que no podrían haberse utilizado en circunstancias normales. Finalmente, la desalación no solo ha entrado en los sectores propios de abastecimiento, turismo y riego, sino que también ha permitido el aprovechamiento de otro recurso valioso, como la regeneración de aguas depuradas.

Palabras clave: *desalación, recurso no convencional, Gran Canaria*

ABSTRACT

There is no doubt that implementation of desalination, as alternative to the conventional resources, allowed the solution of a hydraulic model in extreme situation, and it supposed the development and later summit of the tourist sector, essential for the development of the island. The implementation of desalination from the 70s, started as a basic necessity in certain population centers that began to be overpopulate, beginning with isolated plants that were a world reference. Desalination of seawater has become an essential hydraulic source, mainly in the coastal towns, allowing supply water to wide ranges of population, reaching heights of elevation over a thousand meters. On the other hand, desalination has not only allowed the supply to the population, but it has supposed a resource that has guaranteed continuity to the agriculture sector. Desalination has also been a technique that has allowed the use of conventional resources, such as groundwater with certain levels of salinization, which could not be used under normal circumstances. Finally, desalination has not only come into water supply, tourism and irrigation water sectors, but it has also allowed the use of other valuable resources to an island with scarce water resources, such as regeneration of treated water.

Key words: *desalination, unconventional resource, Gran Canaria.*

INTRODUCCIÓN

Desde tiempos inmemoriales, se sabe que el agua ha jugado siempre un papel protagonista en el desarrollo económico de Gran Canaria. Originalmente el reparto del agua tuvo un papel significativo, comenzando con los repartimientos de agua superficial y tierras para favorecer el proceso colonizador.

Más tarde la escasez de recursos superficiales obligó a la construcción de captaciones de aguas subterráneas, cuyo elevado coste fue asumido por la iniciativa privada mediante un nuevo tipo de sociedad en que la propiedad del agua no estaba ligada a la tierra, la Comunidad de Aguas, encargada del alumbramiento, construcción de los canales y acequias a lo largo de la geografía insular. Las comunidades de aguas se fueron transformando con el tiempo en una industria en sí misma, que rentabiliza su inversión con la comercialización del agua.

En el terreno económico, los primeros siglos estuvieron marcados por el cultivo de la caña de azúcar. A partir del siglo XX, la extensión de otros cultivos, como el plátano y el tomate, provoca un rápido crecimiento de la demanda hidráulica de la isla, empezando a observarse los efectos propios de la explotación del recurso de manera descontrolada.

Es en la segunda década del siglo XX cuando se obliga a solicitar autorización administrativa para las captaciones, lo cual comienza a ser un primer paso de control del dominio público hidráulico y, paralelamente, se apuesta por la construcción de grandes presas. Estas infraestructuras suponen la primera gran intervención directa de la administración en el mercado del agua en la isla.

Pero fundamentalmente, es a partir del último cuarto de siglo, donde el incremento de la demanda, motivada por el incremento de población y el desarrollo turístico, lo que augura la presencia de un colapso económico, cuya punta de iceberg eran las frecuentes restricciones en el abasto a la población.

Nos encontramos con la existencia de 60 grandes presas, 10 de ellas públicas y más de 2.358 obras de captación de aguas subterráneas, ejecutadas a partir de 5.542 expedientes tramitados. Estos números ponen de manifiesto el grado de sobreexplotación que se ha producido en la Isla, provocando un descenso tal del nivel freático que, en algunas zonas, se han producido descensos de más de diez metros por año, alcanzando profundidades medias de extracción de más de trescientos metros. En paralelo, los pozos costeros se encontraban fuertemente salinizados y en los pozos del interior de la isla, la productividad media se había reducido a menos de 1 l/s, con un aumento apreciable de la salinidad.

El continuo crecimiento de la demanda de agua y la imposibilidad de forzar más el uso de los recursos naturales hizo que, para solucionar la presión de las necesidades hidráulicas de la población de Las Palmas, en 1964 el Ministerio de Obras Públicas iniciara un concurso para la adjudicación, construcción y montaje de la planta desaladora Las Palmas I, que entró en servicio en el año 1970. Esta planta fue, en su momento, una de las más grandes del mundo. De esta manera comienza un desarrollo vertiginoso del uso de la desalación como fuente, en primera instancia alternativa y, finalmente, vital de suministro de agua a la población, los sectores turísticos e industrial y el sector agrícola. El desarrollo de estos sistemas de desalación ha permitido superar los ciclos de sequía y las limitaciones por la escasez del recurso natural.

Asimismo, también se ha logrado superar la fase en la que la desalación, en sus diferentes desarrollos tecnológicos, suponía una aventura innovadora y puntera que permitió localizar a Canarias en el mapa tecnológico mundial de la producción industrial de agua, convirtiéndola en un gran laboratorio con la ejecución de plantas piloto a gran escala, lo que facilitó un amplio desarrollo de las técnicas de desalación existentes durante los últimos 50 años.

Para facilitar este desarrollo, se contó con los recursos necesarios de financiación pública, a través de la declaración, en 1984, de la desalación en Canarias como una actuación de Interés General del Estado.

Todas estas actuaciones ha propiciado un modelo consolidado, fuertemente dependiente de la desalación del agua de mar y que alcanza niveles que superan el 50% de los recursos hidráulicos disponibles en la Cuenca Hidrográfica de Gran Canaria.

RECURSO HIDRÁULICO IMPRESCINDIBLE

Como ya hemos comentado antes, para la subsistencia del tejido económico y empresarial de Gran Canaria, se tuvo que recurrir a un recurso hidráulico "raro", extraordinario, caro y, ante todo, necesario en aquellas zonas que carecían de recursos hidráulicos suficientes para atender la creciente demanda.

En la Figura 1 se presenta la simulación de la evolución de la demanda de agua de la isla de Gran Canaria y de los recursos hídricos utilizados (Avance del Plan Territorial Especial Hidrológico de Gran Canaria, 2013), durante el período 1972-2026.

En cuanto a los usos del agua, podemos observar un claro incremento de los usos relativos al consumo de la población y al sector turístico, fruto de la evolución al alza que dichos sectores están experimentando en los últimos años. Por otro lado, desde el punto de vista del sector agrícola, si bien se observa un claro descenso del consumo, las previsiones de futuro no auguran grandes cambios que puedan ser, a priori, significativos, con lo que debe contarse con los necesarios recursos para mantener el tejido agrícola de la isla.

En cuanto a los recursos con los que se cuenta en la isla, cabe destacar el notable incremento que la desalación ha supuesto, principalmente a partir de la década de los noventa, período en el que se materializan parte de las inversiones en materia de desalación fomentadas fundamentalmente por la iniciativa pública. De esas fechas podemos hablar de las desaladoras de los principales núcleos poblacionales de la isla, como Las Palmas, Telde, Mancomunidad del Sureste y otras de iniciativa privada como Bonny y Elmasa, en San Bartolomé de Tirajana, si bien esta última, a diferencia de las primeras, se realizó con tecnología de desalación por EDR, para la desalación de pozos salobres de la zona.

A finales de los noventa se construyeron las principales desaladoras del norte de la isla, como Arucas-Moya, Santa María de Guía (planta de CV) y Gáldar, sin olvidar otras instalaciones de iniciativa privada como la desaladora de Agragua.

Como ya hemos comentado, es a partir de la década de los noventa en donde el crecimiento de la desalación, como recurso alternativo a los tradicionales recursos convencionales produce un auge y posicionamiento tal que, a principios del siglo XXI, el recurso de la desalación supone el 50% del recurso hidráulico total utilizado en la isla.

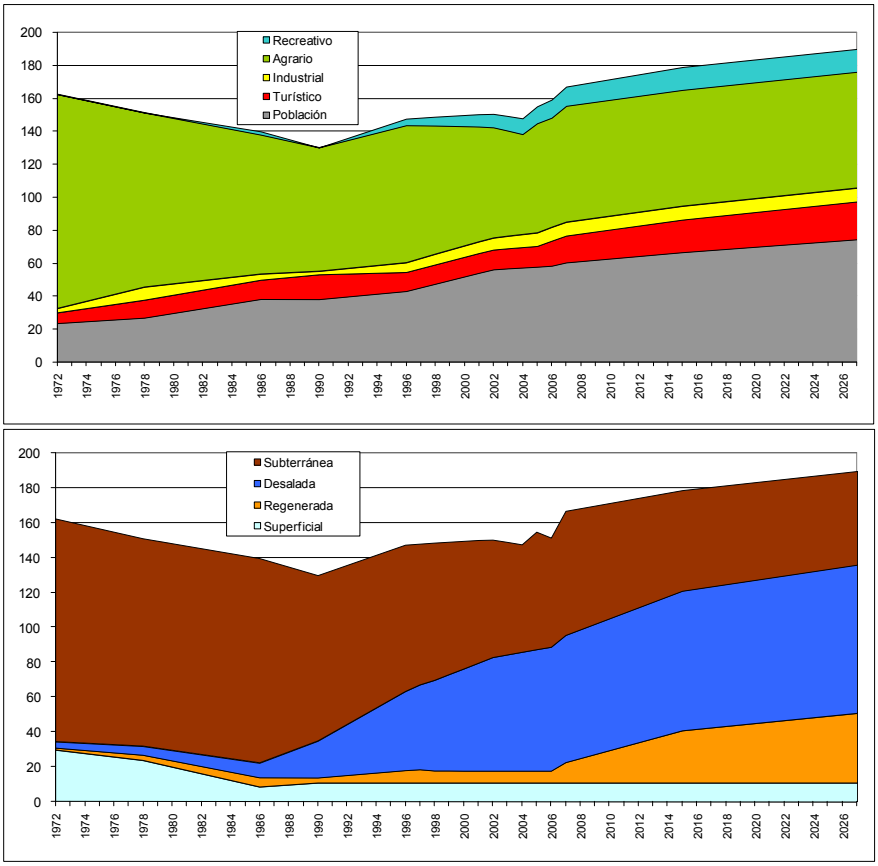


Figura 1. Simulación de demandas de agua y de recursos hídricos utilizados (Avance del Plan Territorial Especial Hidrológico de Gran Canaria, 2013)

Sin embargo, las previsiones con las que se trabaja en el Plan Hidrológico no conllevan a incrementar aún más la dependencia de la desalación en la isla, al menos la desalación de agua de mar (Figura 1). En todo caso, las previsiones establecen un mantenimiento del recurso como necesario, inevitable y constante, buscando otras alternativas de aprovisionamiento de la demanda en la regeneración de aguas residuales. No obstante, esta tendencia al aprovechamiento de un recurso totalmente implantado en el mapa de recursos hidráulicos de la isla como recurso alternativo a los recursos convencionales (subterráneos y superficiales) desde la década de los noventa, también tiene una componente dependiente de la desalación, puesto que, el uso de determinados recursos de agua regenerada, según las zonas, requiere también de técnicas de desalación que garanticen las calidades necesarias del recurso hidráulico a reutilizar, como válidas para el uso al que van a estar dirigidas, primordialmente el sector agrícola.

En la Figura 2 presentamos la evolución de la capacidad nominal de desalación en Gran Canaria. Como se puede observar, la capacidad de producción guarda relación con el incremento del recurso de la desalación, como alternativa a las demandas hidráulicas de la isla. Esta circunstancia apunta a que la construcción de desaladoras ha seguido el carro de las necesidades imperiosas dirigidas a disponer de otras fuentes de agua que paliaran los problemas de escasez hídricos en la isla, hasta el punto en el que, la disponibilidad nominal de la desalación en Gran Canaria, no se afronta como un plan alternativo o plan B ante la escasez de recursos convencionales en determinadas épocas del año, como ocurre con el Programa de desaladoras activado por el Estado en la Cuenca del Mediterráneo en los últimos años, sino que es una herramienta imprescindible y única en la satisfacción de las demandas insulares.

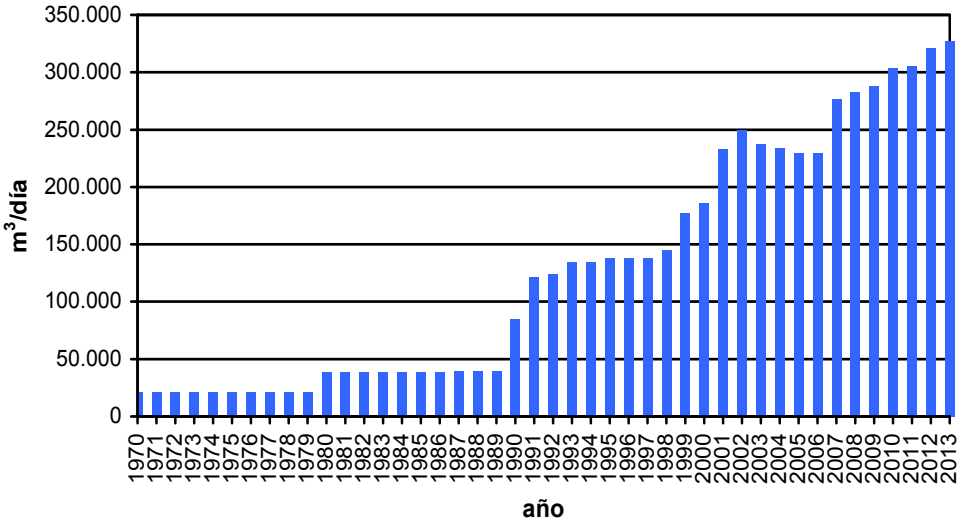


Figura 2. Evolución de la capacidad de producción de agua desalada (Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria complementado con información propia)

TÉCNICA DE DESALACIÓN PARA EL APROVECHAMIENTO DE RECURSOS EN LA ISLA

Como hemos venido comentado, la desalación no sólo ha sido una técnica puesta en práctica únicamente con el agua de mar, si bien es la más importante y destacada desde el punto de vista de la capacidad instalada en la isla.

Conviene matizar la importancia que la desalación ha sido, como técnica ampliamente utilizada en el aprovechamiento de otros recursos, como las aguas subterráneas salinizadas y las aguas depuradas. Las evidentes necesidades de recursos hidráulicos en la isla, han hecho agudizar el ingenio y poner en servicio la desalación en recursos que, aparentemente, carecían de utilidad a la demanda.

En la Figura 3 se representa la distribución porcentual de las capacidades nominales de desalación, teniendo como elemento diferenciador, el recurso empleado como materia prima.

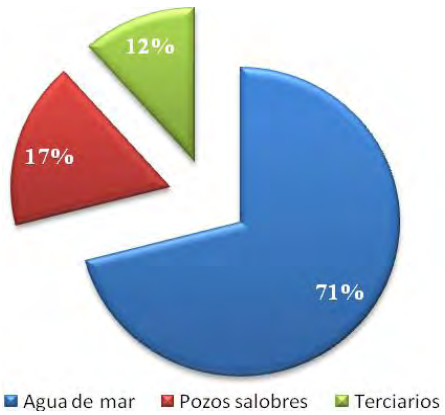


Figura 3. Distribución de las capacidades de desalación por tipo de recurso empleado (Fundación Centro Canario del Agua complementado con información propia)

Como podemos observar, en Gran Canaria la desalación de agua de mar copa la mayor parte de la capacidad instalada. Estamos hablando de una capacidad de producción que supera los 325.000 m³/día, frente a los 80.000 m³/día de capacidad en desaladoras de aguas salobres y los 53.000 m³/día de desalación de aguas regeneradas.

Si observamos la distribución porcentual del número de instalaciones de desalación, en función del recurso utilizado, podemos llegar a otra conclusión, que queda representada en la Figura 4.

Figura 4. Distribución de las capacidades de desalación por tipo de recurso empleado (Fundación Centro Canario del Agua complementado con información propia)

Del gráfico, destacamos que el número de instalaciones de desalación existentes en la isla en materia de aguas salobres, supera ampliamente al resto. Estamos hablando de cerca de 100 instalaciones (de las que tengamos constancia expresa) de aguas salobres, sobre un total de 44 desaladoras de agua de mar y 8 tratamientos terciarios de desalación de aguas regeneradas. Este hecho va en consonancia con el continuado aprovechamiento y sobreexplotación que se ha realizado en la isla, mediante la explotación de las aguas subterráneas a través de pozos, en los que, el continuo incremento de los niveles de salinidad del agua ha hecho necesario la instalación de plantas desaladoras de aguas salobres para continuar con la explotación de dicho recurso hidráulico.

TÉCNICA DE DESALACIÓN EN CONSTANTE DESARROLLO TECNOLÓGICO

Ya hemos hablado de la importancia que la desalación ha jugado en el desarrollo económico y social de la isla y cómo ésta técnica ha servido para el aprovechamiento de recursos que, sin ella, no hubiese sido posible. Hablamos de la desalación de agua de mar, pero tampoco hemos olvidado la práctica de las técnicas de desalación para el reaprovechamiento de pozos salinizados y aguas depuradas con altos valores de conductividad que, a priori, no permitían utilizar convenientemente este recurso.

La "necesidad agudiza el ingenio" y dicha necesidad ha obtenido sus frutos en la implantación, fomento y desarrollo de la desalación en Gran Canaria y, en general, en Canarias.

Partimos, en 1964, de la construcción y puesta en servicio de una planta desaladora de agua de mar que utilizaba técnicas de destilación súbita para la obtención de agua producto, utilizando, como fuente energética, el vapor procedente de una caldera de vapor que

utilizada como combustible primario el Fuel Oil. En la década de los setenta comenzamos hablando de plantas desaladoras de agua de mar, con consumos energéticos que alcanzaban los 25 kWh/m³ de agua producto.

A partir de esta tecnología, en la siguiente década se continuó apostando por procesos de desalación térmicos que, en su diseño lograban mejoras que permitían reducir los consumos energéticos. Hablamos de los procesos términos de desalación de tipo multiefecto y destilación por compresión de vapor, técnicas con las que se alcanzaba reducir el consumo energético, pero no más allá de los 15 kWh/m³. A finales de los ochenta, principios de los noventa se instalaron las plantas de Compresión de vapor de Guía y Puerto Rico.

La desalación de agua de mar por ósmosis inversa comienza su andadura en la isla a finales de los ochenta, siendo su puesta de largo la construcción y puesta en marcha de la EDAM Las Palmas III, con una capacidad nominal de 65.000 m³/día, convirtiéndose en la desaladora de agua de mar más grande de Europa, en aquellos tiempos. En ese momento, se hablaba de consumos energéticos de desalación de 6,5 kWh/m³.

Los procesos de desalación por membrana y su incuestionable bajo consumo energético, en relación con las plantas de destilación que no conlleven procesos de cogeneración, hizo que el desarrollo futuro en desalación se focalizara en la tecnología de membranas.

En Gran Canaria, el desarrollo de la desalación por membranas ha seguido dos vertientes, en función del recurso hidráulico a desalar, de manera que, para el agua de mar, la técnica desarrollada ha sido la de ósmosis inversa y para la desalación de aguas salobres y aguas depuradas, ha existido una convivencia entre las técnicas de desalación de electrodiálisis y ósmosis inversa.

Centrándonos en el principal recurso disponible en Gran Canaria, la desalación de agua de mar, que copa actualmente más del 50% de las demandas de agua en la isla, no cabe duda que el desarrollo de la tecnología de desalación por ósmosis inversa se ha visto reflejada en las diferentes instalaciones ejecutadas a lo largo de los últimos 25 años.

En la Figura 5 se analiza la evolución que ha experimentado el consumo energético específico de la desalación. Podemos observar como el desarrollo de la desalación de agua de mar por osmosis inversa ha jugado un papel decisivo para la obtención de plantas desaladoras con consumos energéticos en desalación inferiores a 2,5 kWh/m³ de agua producto.

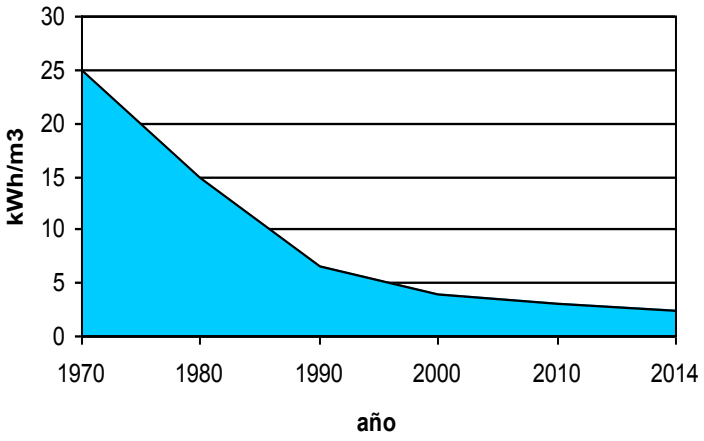


Figura 5. Evolución del consumo energético específico (kWh/m³) en desalación de agua de mar

En el caso particular de Gran Canaria, la evolución experimentada en la reducción de los consumos energéticos a nivel tecnológico aún no se ha visto reflejada en la totalidad de las instalaciones de desalación con las que cuenta la isla, si bien existen grandes esfuerzos, tanto del sector público, como privado, de implementar dichas mejoras en las actuales instalaciones.

CONCLUSIÓN

No cabe duda alguna que la implantación de la desalación de agua, como recurso alternativo a los llamados recursos convencionales, permitió no sólo el desahogo de un modelo hidráulico en estado límite, sino que supuso el desarrollo y posterior auge de un sector, como el turístico, fuente esencial del desarrollo económico y social de la isla.

Desde la implantación de la desalación, a partir de los años 70, ésta se ha convertido en un recurso hidráulico imprescindible dentro del modelo hidráulico insular.

Por último, el desarrollo de la desalación en Canarias y el elevado costo que la acompaña ha obligado a mantener una constante evolución tecnológica en la ejecución de nuevas instalaciones o mejoras de las existentes, en pos de la obtención del menor consumo energético posible.

REFERENCIAS

Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria (2009). *Plan Hidrológico de Gran Canaria*. Documento interno sin publicar.

Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria (2013). *Avance del Plan Territorial Especial Hidrológico de Gran Canaria*.

ISBN: 978-84-938046-4-0

REGENERACIÓN DE EFLUENTES SECUNDARIOS MEDIANTE ULTRAFILTRACIÓN POR MEMBRANAS DE FIBRA HUECA SUMERGIDAS. OPTIMIZACIÓN DE LA DURACIÓN DE LOS CICLOS DE FILTRACIÓN

Luisa VERA PEÑA, Enrique GONZÁLEZ CABRERA, Oliver DÍAZ LÓPEZ, Rubén Darío SÁNCHEZ RODRÍGUEZ, Rafael Antonio BOHORQUE BOHORQUE

Departamento de Ingeniería Química y Tecnología Farmacéutica, Facultad de Química, Universidad de La Laguna, Av. Astrof. Fco. Sanchez s/n. 38200 La Laguna, España, luvera@ull.es, eglezc@ull.es; odiazlop@ull.es ; rdsanchez@outlook.es; rafaelbohorquez@ingenieros.com.

RESUMEN

La aplicación de la ultrafiltración directa para la mejora de efluentes secundarios de depuradoras convencionales se ve limitada por el ensuciamiento de las membranas. En este trabajo se evalúa un modo alternativo de operación que pretende optimizar la duración de los ciclos de filtración con el fin de controlar el ensuciamiento y aumentar la productividad del proceso. Los resultados experimentales han demostrado la alta eficacia del modo alternativo de operación, por presión de consigna, operando con flujos de filtración moderadamente altos (50 L/hm^2), al tratar efluentes secundarios con fracciones significativas de materia particulada y coloidal. El seguimiento del ensuciamiento de la membrana ha revelado que la resistencia hidráulica asociada al ensuciamiento es independiente del flujo de filtración utilizado. Por otro lado, el ensuciamiento es debido principalmente, a la formación de una bio-película sobre la membrana que resulta ser altamente compacta y requiere de limpiezas químicas severas para su eliminación.

Palabras clave: *ultrafiltración, tratamiento terciario, agua regenerada, ensuciamiento de la membrana, presión de consigna.*

ABSTRACT

The direct ultrafiltration as advanced treatment of secondary effluents from conventional wastewater treatment is hindered by the membrane fouling. In this study, an alternative mode of operation which optimize the duration of filtration cycles, was assayed in order to control the membrane fouling and increase the process productivity. Experimental results were highly promising. In fact, the unit has operated at moderately high filtration flux (50 L/hm2) treating secondary effluent with significant fractions of particulate and colloidal matter. The membrane fouling monitoring has revealed that the hydraulic resistance is similar, independently the filtration flux applied. Furthermore, the membrane fouling seems mainly due to biofilm formation on the membrane surface, highly compact and only removed with severe chemical cleaning.

Key words: *ultrafiltration, tertiary treatment, regenerated water, membrane fouling, set-point*

trasnmembrane pressure.

INTRODUCCIÓN

La reutilización de aguas residuales en el riego de cultivos agrícolas es una vía que permite disminuir el consumo de los ya escasos recursos hídricos naturales. En los últimos años, se ha producido un auge de las tecnologías de membranas como tratamientos terciarios, no obstante, la acumulación de ensuciamiento sobre la superficie de la membrana ha limitado su implantación a gran escala (Henderson et al., 2011).

El ensuciamiento de la membrana puede ser causado por partículas, materia orgánica disuelta o sustancias inorgánicas que se depositan sobre su superficie. Se ha observado que en el caso de la ultrafiltración de efluentes secundarios, las sustancias coloidales entre 0,45µm y 0,1µm son altamente colmatantes, produciendo un elevado ensuciamiento residual de la membrana, es decir, que no puede eliminarse por medio de limpiezas físicas. Dentro de estas sustancias aquellas macromoléculas que constituyen las denominadas como materia orgánica del efluente (EfOM), parecen ser las principales causantes del ensuciamiento de la membrana (Haberkamp et al., 2008).

Con el fin de paliar el ensuciamiento se utilizan generalmente, distintas estrategias de tipo físico como por ejemplo, el retrolavado, que consiste en invertir el sentido del flujo de permeado dentro del módulo de membranas. Sin embargo, este método físico de limpieza se aplica habitualmente, con una frecuencia predeterminada (modo de operación temporizado) que conduce a una pérdida de la productividad y eficacia de la filtración. Por el contrario, si se establece un sistema de control del ensuciamiento que permita iniciar el retrolavado cuando la presión transmembrana alcanza un determinado valor (modo de operación por presión de consigna) se consigue optimizar la frecuencia de las limpiezas físicas (Vera et al., 2014).

El objetivo de este trabajo es evaluar el modo alternativo de operación durante la ultrafiltración directa con membranas de fibra hueca de un efluente secundario procedente de un sistema convencional de tratamiento de aguas residuales. Además, se ha analizado la naturaleza del ensuciamiento generado sobre la membrana y las condiciones idóneas del retrolavado para paliar el efecto negativo del ensuciamiento.

METODOLOGÍA

Características del agua de alimentación

En el presente trabajo se ha evaluado la ultrafiltración con membranas de fibra hueca de un efluente secundario procedente de un sistema convencional de lodos activos. La Tabla 1 muestra las características físico-químicas medias del agua de alimentación. Como puede observarse dicha alimentación se caracteriza por presentar alta carga orgánica, alta concentración de sólidos suspendidos y una concentración moderada de amonio.

Tabla 1. Características medias del agua de alimentación.

Parámetro	Unidad	Valor medio	Rango
Demanda Química de oxígeno, DQO	mg/L	251	2877-40
Carbono orgánico total, COT	mg/L	14	21-7
Nitrógeno amoniacal, N-NH_3	mg N/L	33	70-10
Turbidez	NTU	83	975-5
Sólidos Suspendidos Totales, SST	mg/L	151	1990-9
Conductividad	µS/cm	1680	2000-885

Instalación experimental

Los experimentos de ultrafiltración han sido llevados a cabo en una unidad piloto ubicada en la estación de bombeo del sistema de reutilización de aguas depuradas de la Isla de Tenerife. La unidad de filtración está formada por un depósito de proceso, tanque de permeado, compresores para el proceso de limpieza y para la agitación de fondo. La membrana seleccionada para los estudios de filtrabilidad es la ZeedWeed ZW-10 de *GE Water & Process Technologies*, una membrana de fibra hueca fabricada en PVDF, con un diámetro medio de poro de 0,04µm, una superficie de filtración de 0,9 m^2 y un diámetro externo de fibra de 1,9mm. El rechazo del proceso de filtración es extraído continuamente del depósito de proceso por medio de una bomba peristáltica.

La ultrafiltración se realizó a caudal constante, monitorizando la evolución de la presión transmembrana durante el desarrollo de la experimentación que permite estimar el ensuciamiento de la membrana. La filtración en modo frontal (*dead-end*) fue realizada aplicando un modo alternativo de operación basado en el control del ensuciamiento. En este modo de operación, el retrolavado tiene lugar únicamente cuando la presión transmembrana alcanza un valor pre-establecido, denominado presión transmembrana de consigna (TMP_{SP}). Este modo permite ajustar la frecuencia de retrolavado en función del grado de ensuciamiento de la membrana, optimizando así, la duración de los ciclos de filtración. El análisis del ensuciamiento resultante al operar el modo de operación por presión de consigna ha sido realizado para dos flujos de filtración (35 y 50 L/hm^2), condiciones de retrolavado constantes (flujo de retrolavado de 60 L/hm^2 y tiempo de retrolavado de 30s) finado la presión transmembrana de consigna, TMP_{SP} en 40 kPa.

Experimentos de corta duración

Por otro lado, con el fin de analizar la influencia de la duración del retrolavado sobre la limpieza efectiva de la membrana, se llevaron a cabo experimentos de flujo escalonado, que se basan en aplicar incrementos sucesivos y escalonado del flujo de filtración (Drews, 2010). El ensuciamiento remanente de la membrana, entre dos experimentos, se redujo aplicando entre ellos un retrolavado a 60 L/hm^2 (Vera et al., 2014). El ensuciamiento fue evaluado mediante el seguimiento de la variación de la presión trasmembrana con el tiempo para cada escalón de flujo es decir, la velocidad de ensuciamiento reversible (r_f). El flujo escalonado se inició en 10 L/hm^2, con incrementos de 5 unidades hasta un flujo final de 70 L/hm^2. Se evaluaron distintas duraciones de la limpieza física (15, 30 y 60s) y la inyección de aire durante el retrolavado a razón de 1,1 Nm^3/hm^2.

Protocolo de limpieza de la membrana

Al finalizar cada experimento, justo antes de realizar el último retrolavado, se ha realizado

un protocolo de limpieza de la membrana que permite el análisis de las distintas fracciones que componen el ensuciamiento construido sobre la membrana. Se trata de un protocolo de limpieza basado en diferentes etapas (Metzger et al., 2007): (1) enjuague con agua destilada, (2) retrolavado a 90 L/hm^2 con aireación durante 7 minutos, (3) limpieza química por inmersión en disolución de hidróxido sódico (pH ≈ 11) durante 24 horas, (4) limpieza química por inmersión en disolución de hipoclorito sódico (1000 mg/L) durante 24 horas. Entre cada una de las etapas descritas, se ha caracterizado la resistencia de la membrana con el fin de estudiar su evolución. Tras cada protocolo de limpieza, la resistencia de la membrana ha recuperado su valor inicial, demostrando la alta eficacia del proceso de lavado. Además, las aguas de lavado han sido recogidas para su posterior análisis físico-químico.

Métodos analíticos

En cuanto al rendimiento de depuración del sistema de ultrafiltración, se ha realizado el seguimiento de las características físico-químicas de la alimentación y del permeado durante todo el proceso experimental, analizando DQO, $N\text{-}NH_3$, turbidez, SST, COT, pH y conductividad según los métodos normalizados (APHA, 2005). Los análisis de proteínas se han realizado mediante los Kit de proteínas totales (Sigma-Aldrich, TP 0330) basado en el método de Lowry et al. (1951), y en el caso de los polisacáridos se ha usado el método propuesto por Dubois et al. (1956).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto de las condiciones de operación sobre la calidad del permeado

Durante todo el periodo experimental y pese a las fluctuaciones de las características del agua de alimentación, el sistema de ultrafiltración ha producido un permeado de alta calidad. La Tabla 2 muestra los rendimientos medios de depuración obtenido para los principales parámetros estudiados, que han resultado ser independientes de las condiciones de operación aplicadas en el sistema de filtración.

Tabla 2. Porcentaje de depuración medio del proceso de ultrafiltración.

	DQO	COT	$N\text{-}NH_3$	Turbidez
Rendimiento de depuración (%)	82	20	14	99

La ultrafiltración no afecta a la concentración de sales de la alimentación y por tanto, la conductividad no se vio afectada durante la operación. Sin embargo, el diámetro de poro de la membrana permitió un alto rechazo de sólidos presentes en la alimentación y una alta eliminación de turbidez (≈100%).

La alta carga de la alimentación en materia orgánica particulada (251 mg/L DQO) respecto a la disuelta (14 mg/L COT) junto con la total retención de partículas justifica la retención de materia orgánica expresada como DQO (82%), y el valor medio de 44 mg/L de DQO registrado en la corriente de permeado. Por el contrario, la materia orgánica disuelta medida como carbono orgánico total (TOC) solamente experimentó una reducción del 20%, asociada a la retención de biopolímeros sobre la superficie de la membrana, considerados como los principales causantes del ensuciamiento de las membranas de ultrafiltración (Haberkamp et al., 2008).

En cuanto a la eliminación de nutrientes, el sistema logró una reducción de amonio del

14%, debido probablemente a fenómenos de ~~"~~*stripping*" en el depósito de proceso, dado que la agitación del depósito se realizó por el fondo, mediante burbujeo de aire.

Experimentos de corta duración. Influencia de la duración del retrolavado

Los experimentos de corta duración realizados para analizar la influencia de la duración de los retrolavados así como del esfuerzo cortante provocado por la inyección de aire sobre el ensuciamiento de la membrana se presentan en la Figura 1, donde se muestra la velocidad de ensuciamiento de la membrana para cada escalón de flujo y tiempo de retrolavado.

Los resultados indican que el tiempo de retrolavado no tiene influencia sobre el "flujo sostenible" es decir, el flujo al cual el ensuciamiento de las membranas comienza a ser considerablemente alto (>2mbar/min), al menos en los intervalos estudiados, si bien la inyección de aire durante el retrolavado permite reducir ligeramente, la velocidad de ensuciamiento. El retrolavado por sí sólo, parece conseguir desprender el material de la superficie de la membrana, pero el inicio de cada nuevo ciclo de filtración conlleva de nuevo su deposición, generando un ensuciamiento rápido. Por el contrario, al aplicar el retrolavado en presencia de aire se produce una mayor cizalladura sobre la superficie de la membrana que genera por un lado, menor ensuciamiento sobre la membrana y por otro, la redispersión más efectiva de los materiales depositados sobre la membrana, y la construcción del ensuciamiento de forma más lenta en la fase de filtración posterior. Así, el flujo sostenible se situó en torno a 30 L/hm^2 para los ensayos sin aireación durante el retrolavado y en 45 L/hm^2 para aquellos con aireación, en conclusión, la incorporación de un esfuerzo de cizalladura durante el retrolavado permitió reducir el ensuciamiento de la membrana.

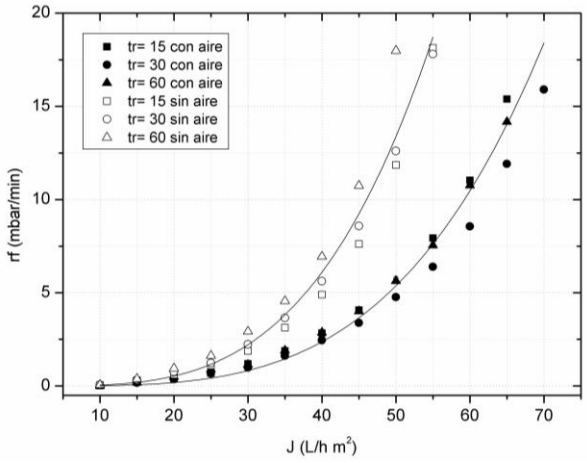


Figura 1. Velocidades de ensuciamiento de los experimentos de corta duración.

Estudio comparativo de los distintos modos de operación

Con el fin de realizar un estudio comparativo entre los modos de operación temporizado y por presión de consigna, se realizaron dos ensayos a flujo de filtración, 35 L/hm^2, operando en el modo temporizado, con un tiempo de filtración de 15 minutos y para el modo de presión de consigna, una TMP_{SP} de 40 kPa. Si bien el modo de operación por presión de consigna, provoca tiempos de filtración variables y depende de la velocidad de ensuciamiento, los resultados obtenidos han mostrado que permite controlar el ensuciamiento de las membranas y realiza limpiezas únicamente, cuando la membrana lo requiere. De esta manera consigue incrementar el flujo neto de 31 a 34 L/hm^2, al aumentar el tiempo de filtración de 15 a 56 minutos, es decir, el sistema operado por presión de consigna optimiza el tiempo de filtración y la eficacia de las limpiezas, contribuyendo así a la

productividad del proceso (Vera et al., 2014).

Experimentos de larga duración. Análisis del ensuciamiento.

El desarrollo de experimentos de larga duración permitió analizar la naturaleza del ensuciamiento que se produce en la membrana al operar en modo presión de consigna. Para ello se ensayaron dos flujos de filtración 35 y 50 L/hm^2 analizando la evolución de la presión inicial de cada ciclo de filtración, TMP_0. Este parámetro indica la evolución del ensuciamiento residual de la membrana, que suele predominar en los sistemas de ultrafiltración (Zheng et al., 2014).

La Figura 2A muestra el progresivo aumento de la TMP_0 para los dos flujos de filtración ensayados, indicando la existencia de un ensuciamiento residual que no puede ser eliminado mediante retrolavados, principal causante de la perdida de permeabilidad de la membrana. En ambos casos se observó que la membrana experimentó un rápido ensuciamiento reversible durante las primeras horas de experimentación, y una vez alcanzado el régimen estacionario, el ensuciamiento residual aumentó pero a un ritmo de crecimiento inferior.

Por otro lado, es preciso indicar que los valores de TMP_0 fueron superiores al operar al mayor flujo, en consonancia con la relación entre flujo de filtración y presión transmembrana descrita por la ley de Darcy. No obstante, la resistencia total a la transferencia de materia en ambos casos fue similar, como se observa en la Figura 2B.

Por el contrario, el ensuciamiento reversible si se ha visto afectado por el flujo de filtración, puesto que a 50, el valor medio de r_f ha sido 13,1 mbar/min y a 30 L/hm^2 fue 1,9 mbar/min, debido a la relación existente entre flujo de filtración y velocidad de ensuciamiento según estudios previos (Sioutopoulos y Karabelas, 2015).

En ambos caso, el modo de operación por presión de consigna permitió obtener ciclos largos de filtración, lo que se traduce en un moderado flujo neto, con una pérdida de productividad inferior al 15%, para los dos flujos de filtración estudiados.

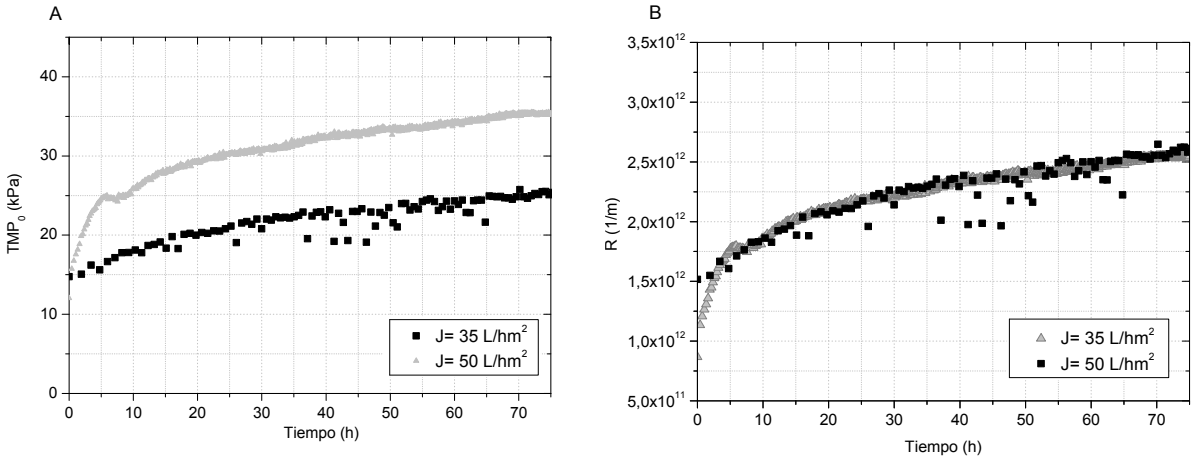


Figura 2. Evolución del ensuciamiento residual en experimentos de larga duración.

Al finalizar cada experimento, se llevó a cabo el protocolo de limpieza descrito anteriormente en el capítulo ―Metodologia", con el objetivo de caracterizar el ensuciamiento producido sobre la membrana. Con el fin de simplificar y agrupando las etapas de limpiezas

en: limpiezas físicas (enjuague y retrolavado) causantes de un ensuciamiento reversible y limpiezas químicas (lavado con NaOH e hipoclorito sódico) causantes del ensuciamiento residual, se observó que el carácter irreversible del ensuciamiento fue muy acusado pues más del 75% de la resistencia total observada se debió a un ensuciamiento eliminado únicamente por limpiezas químicas. Este comportamiento es habitual en sistemas de ultrafiltración directa de efluentes secundarios, donde el mecanismo de ensuciamiento predominante es la formación de un gel externo o biopelícula y el bloqueo de poros debido a la concentración de materia orgánica del efluente (EfOM). Las interacciones entre dichas materias y la membrana, son superiores a la fuerza hidráulica introducida por medio del retrolavado (Zheng et al., 2014; Haberkamp et al., 2008). La EfOM está constituida principalmente por biopolímeros como proteínas y polisacáridos (Henderson, et al. 2011), aunque existen otras sustancias como ácidos nucleicos o lípidos, entre otros, que contribuyen en un menor grado al ensuciamiento residual (Zheng et al., 2014). El análisis de proteínas y polisacáridos realizado a la alimentación y el permeado ha revelado que la membrana retiene un 38% de las proteínas y un 40% de los polisacáridos, obteniéndose en el permeado concentraciones de 52 mg/L y 28 mg/L de proteínas y polisacáridos, respectivamente. Este elevado corte de biopolímeros contribuye a justificar el elevado ensuciamiento residual observado en la membrana.

Por otro lado, el análisis de las aguas de lavado obtenido en cada una de las etapas de limpieza ha permitido determinar que el 60% de las proteínas depositadas sobre la membrana se encuentran en la fracción correspondiente al ensuciamiento residual, por el contrario el 70% de los polisacáridos se encuentran en la fracción correspondiente al ensuciamiento reversible. Este fenómeno puede ser debido a la tendencia natural de los polisacáridos a formar un gel o biopelícula, mientras que las proteínas tienden a adherirse sobre la superficie de la membrana o a bloquear los poros (Haberkamp et al., 2008).

Un estudio más detallado del ensuciamiento sobre la membrana, por medio de técnicas microbiológicas reveló un alto contenido en microalgas, diatomeas y amebas, que podrían contribuir a la formación de una biopelícula que contribuiría al ensuciamiento residual de la membrana.

CONCLUSIONES

El modo alternativo de operación por presión de consigna (TMP_{SP}) ha permitido optimizar la duración de los ciclos de filtración, incrementando el flujo neto obtenido por medio del control del ensuciamiento de la membrana. El ensuciamiento observado al operar en dicho modo, parece no verse afectado por las condiciones de operación ensayadas, y deberse a la formación de una biopelícula y al bloqueo de poros generado por la carga orgánica de la alimentación. Por último, destacar que el modo de operación evaluado no afecta la calidad de permeado obtenido, que resultó siempre alta.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a BALTEN (Balsas de Tenerife) y al Laboratorio de Análisis de Aguas del Departamento de Ingeniería Química y Tecnología Farmacéutica de la Universidad de La Laguna su colaboración en el desarrollo de este trabajo. También al Dr. Néstor Abreu Acosta y a eBios (Enviromental, Biotechnology and Sustainability) por su interés y la determinación microbiológica de las especies constituyentes de la biopelícula.

REFERENCIAS

APHA, American Public Health Association/Water Enviromental Federation (2005), *Standard Methods for the examination of Water and Wastewater*, 21 st ed.

Drews, A. (2010) Membrane fouling in membrane bioreactors—Characterisation, contradictions, causes and cures, Journal of Membrane Science, 363, 1–28.

Dubois, M.; Gilles, K.; Gilles, A.; Hamilton, J.K.; Rebers, P.A.; Smith, F. (1956). *Colorimetric method for determination of sugars and related substances*, Anaytical Chemistry 28: 350-356

Haberkamp, J.; Ernst, M.; Böckelmann, U.; Szewzyk, U.; Jekel, M. (2008). *Complexity of ultrafiltration membrane fouling caused by macromolecular disolved organic compounds in secondary effluents.* Water research 42: 3153-3161

Henderson, R.K.; Subhi, N.; Antony, A.; Khan, S.J.; Murphy K.R.; Leslie G.L.; Chen, V.; Stuetz R.M.; Le-Clech, P. (2011). *Evaluation of effluent organic matter fouling in ultrafiltration treatment using advance organic characterization techniques*. Journal of Membrane Science 382: 50-59.

Lowry, O.; Rosebrough, N.; Lewis Farr, A.; Randall, R. (1951). *Protein measurement with the Folin phenol reagenet*, Journal of Biological Chemestry 193: 265-275.

Metzger, U.; Le-Clech, P.; Stuetz, R.M.; Frimmel, F. H.; Chen, V. (2007). *Characterisation of polymeri Fouling in membrane bioreactors and the effect of different filtration modes*. Journal of Membrane Science 301: 180-189.

Sioutopoulos D.C.; Karabelas A.J. (2015). *The effect of permeation flux on the specific resitance of polysaccharide fouling layers developing during dead-end filtration.* Journal of Membrane Science 473: 292-301.

Vera, L.; González, E.; Díaz, O.; Delgado, S. (2014). Application of a backwashing strategy based on transmembrane pressure set-point in a tertiary submerged membrane bioreactor, Journal of Membrane Science 470: 504-512.

Zheng, X.; Khan, M.T.; Croué J.P. (2014). *Contribution of effluent organic matter (EfOM) to ultrafiltration (UF) membrane fouling: Isolation, Characterization, and fouling effect of EfOM fraction*. Water Research 65: 414-424.

ISBN: 978-84-938046-4-0

SOBRE LA GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN HOTELES Y RESORTS

Manuel HERNÁNDEZ

Fundación Centro Canario del Agua mhernandez@fcca.es

RESUMEN

En Canarias existen numerosos complejos hoteleros que disponen de desaladoras propias destinadas al autoconsumo. Normalmente se requiere que el postratamiento cumpla como mínimo con el RD 140/2003. Esto es, que -0,5 ≤ LSI ≤+0,5. Sin embargo, en muchos casos, se barajan también otros criterios de calidad, como por ejemplo: un pH menor de 8, de forma que se pueda garantizar un cloración adecuada y un control de la Legionella; un agua que mantenga un LSI < 0 a 70ºC, con el fin de no causar problemas de incrustaciones en los calentadores de las cafeteras ni en las calderas de agua caliente; un agua que minimice el consumo de ácido de las piscinas ya que éstas requieren un pH de 7,4-7,6 para mantener una buena cloración y, por último, un agua estable con un contenido en CO2 próximo al de equilibrio con la atmósfera capaz de mantener un LSI < 0 a 50ºC con el fin de evitar la obstrucción de los goteros de los jardines. En algunos casos ocurre también que el postratamiento de todo el caudal requiere más espacio del disponible en el emplazamiento. Para estos casos se diseña un postratamiento con un tratamiento de sólo una parte del caudal, pudiendo reducirse el caudal de agua tratada hasta un 60% del caudal total. Esto afecta considerablemente al proceso y requiere aumentar la dosis CO2 con el fin de que la mezcla con el permeado cumpla con la calidad exigida. Por tanto, y según las necesidades de cada caso, se requieren diferentes fórmulas para obtener la calidad del agua solicitada. En este artículo se presentan distintas opciones para el diseño del postratamiento así como los protocolos de control, factibles de ser automatizados.

ÁREA TEMÁTICA 4

AGUA Y SALUD: DESDE LAS AGUAS MINEROMEDICINALES HASTA LA PREVENCIÓN DE RIESGOS Y EPIDEMIAS

ISBN: 978-84-938046-4-0

DETERMINACIÓN DE HORMONAS ESTEROIDEAS EN AGUAS DEPURADAS DE LA ISLA DE GRAN CANARIA

Rayco GUEDES ALONSO, Zoraida SOSA FERRERA y José Juan SANTANA RODRÍGUEZ

Departamento de Química. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. 35017. Las Palmas de Gran Canaria, España. rayco.guedes@ulpgc.es

RESUMEN

La comunidad científica internacional ha mostrado su preocupación en las últimas décadas sobre la presencia de hormonas esteroideas en el medio ambiente, las cuales han sido catalogadas como "compuestos disruptores endocrinos" (EDCs). Las hormonas pueden llegar al medio a través de diferentes vías, siendo la fuente principal la descarga al medio de los efluentes de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDARs), debido a la eliminación incompleta de estos compuestos que se produce en ellas. Las concentraciones de hormonas presentes en el medio acuático suelen ser del orden de $ng \cdot L^{-1}$, por lo que se necesitan metodologías analíticas sensibles y selectivas para su determinación. La extracción en fase sólida, combinada con cromatografía líquida de alta o ultra resolución, cumple estas condiciones por lo que se ha elegido este proceso para realizar la extracción, preconcentración y determinación de estos compuestos en aguas residuales. En el presente trabajo se determinan 15 hormonas, pertenecientes a cuatro familias de hormonas esteroideas, mediante extracción en fase sólida y cromatografía líquida de ultra resolución con detección de espectrometría de masas (SPE-UHPLC-MS/MS), presentes en muestras de aguas residuales de entrada y salida de estaciones depuradoras de la isla de Gran Canaria.

Palabras clave: *Hormonas, Extracción en Fase Sólida, Cromatografía Líquida, Aguas residuales.*

ABSTRACT

For the last decades, the scientific community has noticed the presence of steroid hormones in the environment which has been classified as "endocrine disrupting compounds" (EDCs). Hormonal compounds could reach the Environment through different ways, but the principal way is through the effluents of the wastewater treatment plants (WWTPs), due to the incomplete removal of the compounds in them. The hormone concentrations present in aquatic environment are about $ng \cdot L^{-1}$ so it is necessary the develop of sensible and selective analytical methods for its determination. Solid phase extraction coupled with high or ultra-high performance liquid chromatography is appropriate for this analysis. For this reason, this methodology has been chosen for the extraction, preconcentration and determination of hormonal compounds in wastewater. In this work, the determination of 15 hormonal compounds from all the subfamilies of hormones using solid phase extraction coupled with high or ultra-high performance liquid

chromatography with mass spectrometry detection in tandem (SPE-UHPLC-MS/MS) is shown. This method allows the determination and quantification of hormonal compounds in influent and effluent waters from wastewater treatment plants of Gran Canaria Island (Spain).

Key words: *Hormones, Solid Phase Extraction, Liquid Chromatography, Wastewaters*

INTRODUCCIÓN

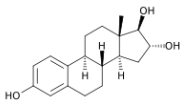
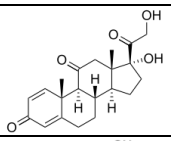
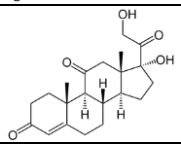
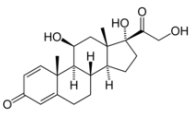
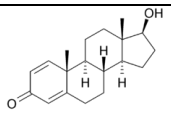
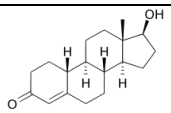
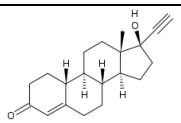
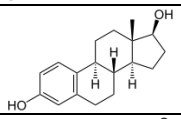
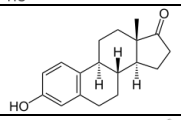
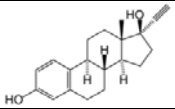
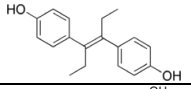
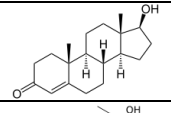
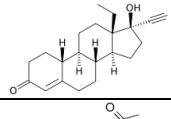
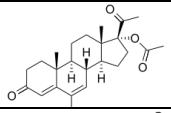
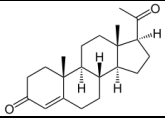
El desarrollo del mundo moderno ha llevado consigo una importante industrialización y una gran producción, que han hecho que aumente la preocupación por el Medio Ambiente y el desarrollo sostenible. Desde esta perspectiva, es preciso suministrar información con un nivel de calidad suficiente para evaluar el estado de éste. En general, podemos suponer que más de 100.000 compuestos químicos diferentes pueden entrar en el Medio Ambiente, muchos de ellos en cantidades muy pequeñas. Muchos de estos compuestos no están recogidos en la legislación como contaminantes. Son los denominados contaminantes emergentes, que causan efectos sobre el ecosistema. Estos contaminantes emergentes son compuestos que, aunque aún no están regulados como contaminantes, son firmes candidatos a estarlo en el futuro, dependiendo de la investigación sobre sus potenciales efectos tóxicos y de los datos disponibles que puedan demostrar su existencia.

Las hormonas esteroideas son un grupo de compuestos dentro de los contaminantes emergentes, las cuales se suelen clasificar en diferentes subgrupos como son los glucocorticoides, andrógenos, estrógenos y progestágenos (Tabla 1). Las hormonas esteroideas ayudan al control del metabolismo, inflamación, funciones inmunológicas, equilibrio de sal y agua, desarrollo de las características sexuales y capacidad de resistir enfermedades (Ying et al., 2002). El término esteroide describe tanto las hormonas naturales producidas por el cuerpo así como a los medicamentos producidos artificialmente que duplican la acción de los esteroides naturales. Las hormonas esteroideas, tanto naturales como artificiales, excretadas diariamente, alcanzan el medio a través de los efluentes de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDARs), por lo que muchos autores han determinado que las EDARs son la principal fuente de contaminación del medio acuático por hormonas (Stafiej et al., 2007; Robinson et al., 2007). Esta contaminación se debe a la estabilidad, resistencia a la degradación microbiana y biodisponibilidad de los compuestos hormonales (Lange et al., 2002).

El hecho de que las hormonas esteroideas sean consideradas contaminantes emergentes se debe a que diversos estudios, desde los desarrollados por Jobling y Sumpter a principios de los años 90, han determinado efectos tóxicos sobre organismos acuáticos. Estos efectos comprenden cambios fisiológicos en peces, producidos por la presencia de estrógenos (Sumpter & Jobling, 1995), disminución de la reproducción de peces como el “zebra fish” (Colman et al., 2009) o cambios de niveles de vitelogenina en organismos marinos expuestos a concentraciones de 1 ng·L-1 de estradiol (Hansen et al., 1998).

El objetivo de este trabajo es la determinación de 15 hormonas, pertenecientes a cuatro familias de hormonas esteroideas, mediante extracción en fase sólida y cromatografía líquida de ultra resolución con detección de espectrometría de masas (SPE-UHPLC-MS/MS), presentes en muestras de aguas residuales de entrada y salida de estaciones depuradoras de aguas residuales de la isla de Gran Canaria, con diferentes tratamientos.

Tabla 1. Nombre y acrónimos de los compuestos hormonales estudiados, así como valores de pKa, estructura química y tiempo de retención.

Compuesto		pK_a (Scifinder Database)	Estructura	t_R (min)
E3	Estriol	10.3		2.12
PRED	Prednisone	12.4		2.29
COR	Cortisone	12.4		2.32
PREDNL	Prednisolone	12.5		2.45
BOL	Boldenone	15.1		2.87
NAN	Nandrolone	15.1		2.93
NORET	Norethisterone	13.1		2.95
E2	17β-estradiol	10.3		2.97
E1	Estrone	10.3		2.99
EE	17α-ethynilestradiol	10.3		3.00
DES	Diethylstilbestrol	10.2		3.02
TES	Testosterone	15.1		3.15
NORG	Norgestrel	13.1		3.29
MGA	Megestrol acetate	--		3.54
PRO	Progesterone	--		3.71

METODOLOGÍA

Reactivos

Todos los compuestos hormonales presentan una pureza superior al 95% y son de la marca Sigma-Aldrich (Madrid, España). Se prepararon disoluciones patrón de 1000 $mg \cdot L^{-1}$ de cada compuesto, así como una mezcla de todos los compuestos a una concentración de 10 $mg \cdot L^{-1}$, las cuales fueron guardadas a -20ºC. A partir de estas disoluciones patrón se realizaron diariamente las de trabajo. El agua ultra-pura utilizada se obtuvo a partir de un sistema Milli-Q de Millipore (Bedford, EEUU). El metanol calidad HPLC, calidad LC-MS, agua LC-MS, así como el amoniaco utilizado para regular el pH de la fase móvil se obtuvieron de Panreac Química (Barcelona, España)

Toma de muestras

Las muestras se tomaron en el influente y el efluente de dos estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) situadas en el norte de la isla de Gran Canaria en los meses de mayo y agosto de 2012 y mayo de 2013. La EDAR1 utiliza un método de lodos activos como sistema de depuración, mientras que la EDAR2 presenta un tratamiento de biorreactor de membrana. Las muestras fueron tomadas en botellas de vidrio ámbar de 2 L, lavadas previamente con agua ultrapura y metanol. Una vez en el laboratorio, las muestras se filtraron a través de filtros de membrana de 0,65 µm precedidos de un prefiltro de fibra de vidrio (Millipore, Irlanda) y se guardaron en oscuridad a 4ºC hasta el momento de ser extraídas.

Instrumentación

Las muestras han sido analizadas en un sistema de cromatografía líquida de ultra-resolución, con detección de espectrometría de masas en tándem (UHPLC-MS/MS) de la marca Waters (Barcelona, España) formado por una bomba binaria (BSM) utilizada para impulsar la fase móvil, un autosampler modelo 2777 equipado con una jeringa de 25 µL y una bandeja de muestras de viales de 2 mL y un detector de espectrometría de masas de triple cuadrupolo (TQD) con interfase de ionización por electrospray (ESI). Todos estos módulos se controlan a través del software Masslynx 5.1, suministrado también por la compañía Waters (Barcelona, España). Los parámetros de la ionización por electrospray son los siguientes: voltaje de capilar de 3 kV en modo positivo y -2 kV en modo negativo, 150 y 500ºC de temperatura de la fuente y de desolvatación, respectivamente y nitrógeno como gas de desolvatación a un flujo de 1000 $L \cdot hr^{-1}$. Como gas de colisión se utilizó argón a un flujo de 50 $mL \cdot hr^{-1}$.

Las masas utilizadas para la identificación y determinación de cada uno de los compuestos hormonales se presentan en la Tabla 2. Estos parámetros fueron optimizados inyectando directamente en el detector una disolución patrón de cada compuesto individualmente a una concentración de 1 $mg \cdot L^{-1}$ a un flujo de 20 $\mu L \cdot min^{-1}$. Así se optimizaron variables como los diferentes iones precursores, los voltajes de cono, los distintos iones “hijos” o de fragmentación y los potenciales de colisión correspondientes.

Condiciones cromatográficas

La columna utilizada ha sido una ACQUITY UPLC BEH C_{18} de 50 x 2,1 mm y tamaño de partícula de 1,7 µm de Waters (Barcelona, España) a una temperatura de 35ºC. Para la separación cromatográfica de los compuestos se utilizó agua con un 0,1% de amoniaco y metanol sin aditivos con el siguiente gradiente: comienzo a 50:50 de mezcla agua:metanol, cambio a 25:75 en 3 minutos, vuelta a las condiciones iniciales en 1 minuto y reequilibrio de

la presión del sistema durante 1,5 minutos más. El flujo de fase móvil fue de 0,3 $mL \cdot min^{-1}$ y el volumen de inyección fue de 5 µL.

Tabla 2. Parámetros del detector de espectrometría de masas para la determinación de los compuestos hormonales de estudio.

Compuesto	Ion precursor, m/z	Voltaje de cono (Modo de ionización)	Ion de cuantificación, m/z (potencial de colisión)	Ion de confirmación, m/z (potencial de colisión)
E3	287.2	-65 V (ESI –)	171.0 (37V)	145.2 (39V)
PRED	359.3	30 V (ESI +)	147.0 (15V)	237.0 (20V)
COR	361.3	30 V (ESI +)	163.0 (25V)	121.0 (45V)
PREDNL	361.3	20 V (ESI +)	147.1 (20V)	173.1 (25V)
BOL	287.2	30 V (ESI +)	121.0 (28V)	135.1 (15V)
NAN	275.2	35 V (ESI +)	109.1 (20V)	83.0 (30V)
NORET	299.2	30 V (ESI +)	109.1 (25V)	91.0 (40V)
E2	271.2	-65 V (ESI –)	145.1 (40V)	183.1 (31V)
E1	269.2	-65 V (ESI –)	145.0 (36V)	143.0 (48V)
EE	295.2	-60 V (ESI –)	145.0 (37V)	158.9 (33V)
DES	267.1	-50 V (ESI –)	237.1 (29V)	251.1 (25V)
TES	289.2	38 V (ESI +)	97.0 (22V)	104.0 (21V)
NORG	313.2	38 V (ESI +)	109.0 (26V)	245.1 (18V)
MGA	385.5	30 V (ESI +)	267.3 (15V)	224.2 (30V)
PRO	315.3	30 V (ESI +)	97.0 (18V)	109.1 (25V)

Extracción de los analitos

Como método de extracción se ha utilizado la extracción en fase sólida (SPE por sus siglas en inglés) con cartuchos Sep-Pak C_{18} de Waters (Barcelona, España). Las condiciones óptimas de extracción son: 250 mL de muestra a pH = 8 y 0% de adición de NaCl, paso de lavado de 5 mL de agua Milli-Q y desorción con 2 mL de metanol. Estas condiciones se han obtenido como óptimas en el desarrollo del método de extracción publicado por Guedes-Alonso et al., 2013.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Parámetros analíticos

Para determinar los parámetros analíticos del método, así como para cuantificar las concentraciones en las muestras reales se realizaron curvas de calibrado diluyendo la disolución patrón en concentraciones de entre 1 y 100 $\mu g \cdot L^{-1}$. Una vez obtenidas las áreas de cada concentración para cada compuesto, se realizaron las rectas de calibración correspondientes, obteniéndose coeficientes de regresión lineal satisfactorios ($r^2 > 0,99$)

Los límites de detección (LD) y cuantificación (LC) de cada compuesto se calcularon utilizando la relación entre la señal y el ruido de fondo. Una relación igual a 3 fue definida como límite de detección, mientras que la relación igual a 10 se escogió como límite de cuantificación. Los LDs obtenidos se situaron en el rango de 0,15 a 9,35 $ng \cdot L^{-1}$, mientras que los LCs obtenidos variaron entre 0,49 y 31,18 $ng \cdot L^{-1}$.

La calidad y fiabilidad del método analítico se comprobaron determinando la repetibilidad del proceso analítico así como los porcentajes de recuperación del proceso de extracción, utilizando 6 muestras (n=6). Para la repetibilidad se calculó la desviación estándar relativa (RSD) para cada compuesto, las cuales estuvieron siempre por debajo del 8,4%. En cuanto a los porcentajes de recuperación, fueron variables dependiendo de la matriz, pero

superiores al 70% en la mayoría de los casos.

Análisis de hormonas en aguas residuales.

El método desarrollado se aplicó a muestras de agua residual procedentes de dos estaciones depuradoras de aguas residuales (EDARs) de la isla de Gran Canaria que emplean diferentes tratamientos. La denominada EDAR1 utiliza un sistema de tratamiento clásico de lodos activados, mientras que la EDAR2 emplea un método de depuración basado en un biorreactor de membrana. Una vez analizadas las muestras obtenidas en mayo y agosto de 2012 y mayo de 2013, se determinó la concentración de los compuestos detectados. Dichas concentraciones vienen reflejadas en la Figura 1.

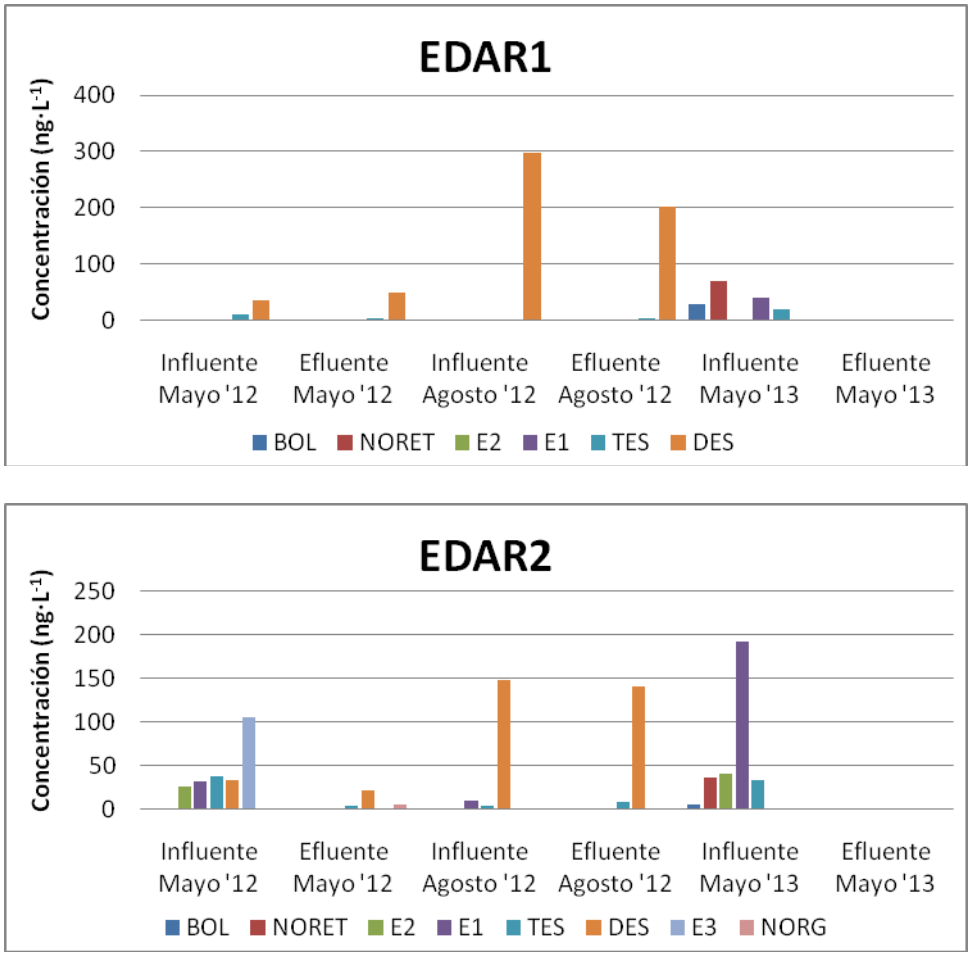


Figura 1. Concentraciones detectadas de hormonas en las estaciones depuradoras de estudio.

Se puede comprobar que en la EDAR1 se detectan menos compuestos, aunque, normalmente, en concentraciones por encima de 50 $ng \cdot L^{-1}$. Por el contrario, en la EDAR2, se detectan compuestos que no se detectan en la EDAR1, como el 17β-estradiol, el estriol o el norgestrel, pero las concentraciones detectadas son más bajas. Rara vez se supera en esta depuradora el valor de 50 $ng \cdot L^{-1}$ para algún compuesto, excepto para el estriol en el influente del primer muestreo, el dietilestilbestrol en las muestras del segundo o la estrona en el influente del tercer muestreo. Comprobamos además que existe gran variabilidad entre muestreos, debido principalmente a la complejidad de las muestras.

En cuanto a la eliminación de este tipo de compuesto por parte de las tecnologías usadas en cada EDAR, se pueden ver algunas tendencias, aunque sería necesario aumentar el

número de muestreos para determinar una eliminación real. En la EDAR1 se produce una eliminación superior al 88% para todos los compuestos, excepto para el dietilestilbestrol, que presenta una baja eliminación en el segundo muestreo y un aumento de la concentración durante la depuración en el primero. En la EDAR2 ocurre algo parecido, pues todos los compuestos detectados en el primer muestreo se eliminan totalmente o sus concentraciones son más bajas, con excepción del norgestrel, aunque su concentración en el efluente es de menos de 10 $ng \cdot L^{-1}$. En esta EDAR el dietilestilbestrol si se elimina parcialmente (entre un 5 y un 34%) y sólo aumenta la concentración de testosterona en el segundo muestreo, que pasa de 3,5 $ng \cdot L^{-1}$ en la muestra de entrada a casi 8 $ng \cdot L^{-1}$ en el efluente. Finalmente, hay que destacar que en ambas depuradoras se produce una buena eliminación de los compuestos hormonales en el tercer muestreo al detectarse concentraciones de compuestos hormonales sólo en la muestra de influente de ambas.

CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un método analítico para determinar compuestos hormonales en aguas residuales procedentes de la isla de Gran Canaria. El método es sensible, reproducible, con límites de detección y de cuantificación en el rango de 0,15 a 9,35 $ng \cdot L^{-1}$, y 0,49 y 31,18 $ng \cdot L^{-1}$, respectivamente, adecuados para el estudio de este tipo de contaminantes emergentes en el medio acuáticos. Una vez desarrollado, el método se utilizó para determinar compuestos hormonales en muestras de influente y efluente de dos estaciones depuradoras de aguas residuales que utilizan diferentes tecnologías de depuración.

En ambas EDARs se detectaron diversos compuestos hormonales (hasta 5 diferentes en la EDAR1 y hasta 8 diferentes en la EDAR2) en concentraciones normalmente inferiores a 50 $ng \cdot L^{-1}$, aunque en algunos casos las concentraciones para compuestos como el dietilestilbestrol, la estrona o el estriol, fueron más altas, llegando hasta casi 300 $ng \cdot L^{-1}$. En cuanto a la eliminación de los compuestos, se produce una alta eliminación de los compuestos hormonales durante el proceso de depuración, excepto para algunos compuestos como el dietilestilbestrol.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado con fondos del Ministerio de Ciencia y Tecnología dentro del proyecto de Investigación con referencia CTQ-2010-20554. Asimismo, Rayco Guedes Alonso agradece a la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria por su beca Predoctoral, dentro de la cual se llevó a cabo este trabajo.

REFERENCIAS

Colman, J.R.; Baldwin, D.; Johnson, L.L. y Scholz, N.L. (2009). *Effects of the synthetic estrogen, 17α-ethinylestradiol, on aggression and courtship behavior in male zebrafish (Danio rerio).* Aquatic Toxicology 91: 346-354

Guedes-Alonso, R.; Sosa-Ferrera, Z.; Santana-Rodríguez, J.J. (2013). *Simultaneous Determination of Hormonal Residues in Treated Waters Using Ultrahigh Performance Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry.* Journal of Analytical Methods in Chemistry 2013: 210653

Hansen, P.-D.; Dizer, H.; Hock, B.; Marx, A.; Sherry, J.; McMaster, M. y Blaise, C. (1998). *Vitellogenin – a biomarker for endocrine disruptors.* Trends in analytical chemistry 17: 448-451

Lange, I.G.; Daxenberger, B.; Schiffer, B.; Witters, H.; Ibarreta, D. y Meyer, H.H.D. (2002). *Sex hormones originating from different livestock production systems: fate and potential disrupting activity in the environment.* Analytica Chimica Acta 473: 27-37

Robinson, I.; Junqua, G.; Coillie, R.V. y Thomas, O. (2007). *Trends in the detection of pharmaceutical products, and their impact and mitigation in water and wastewater in North America.* Analytical and Bioanalytical Chemistry 387: 1143-1151

Scifinder; Chemical Abstracts Service: Columbus, OH; pKa; https://scifinder.cas.org (accessed November, 2014); calculated using Advanced Chemistry Development (ACD/Labs) Software V11.02. 1994-2013

Stafiej, A.; Pyrzynska, K. y Regan, F. (2007). *Determination of anti-inflammatory drugs and estrogens in water by HPLC with UV detection.* Journal of Separation Science 30: 985-991

Sumpter, J.P. y Jobling, S. (1995). *Vitellogenesis as a biomarker for estrogenic contamination of the aquatic environment.* Environmental Health Perspectives 103: 173-178

Ying, G.G.; Kookana, R. y Ru, Y.J. (2002). *Occurrence and fate of hormone steroids in the environment*. Environment International 28 (6): 545-551.

ISBN: 978-84-938046-4-0

INFLUENCIA DEL ORIGEN VOLCÁNICO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS Y LA CALIDAD QUÍMICA DEL AGUA DE CONSUMO HUMANO EN LAS ISLAS CANARIAS

Macrina Mª MARTÍN DELGADO[1], Mª Luisa PITA TOLEDO[2], Julia CAMPOS DÍAZ[1] y Mª Esther FIERRO PERAL[1]

[1] Dirección General de Salud Pública. Servicio Canario de la Salud. Rambla Santa Cruz 53. 38006 Santa Cruz de Tenerife. mmardel@gobiernodecanarias.org, jcamdiad@gobiernodecanarias.org, mfieper@gobiernodecanarias.org.
[2] Dirección General de Salud Pública. Servicio Canario de la Salud. Calle Alfonso XIII 4. 35003 Las Palmas de Gran Canaria. mpittol@gobiernodecanarias.org.

RESUMEN

El acceso a agua apta para el consumo es un determinante principal de la salud. Disponer de agua de calidad y en cantidad suficientes está considerado el avance biomédico más importante de los últimos dos siglos, por los esfuerzos realizados, la incorporación de tecnologías y la introducción de sistemas de información, como el Sistema de Información Nacional de Agua de Consumo (SINAC). Los riesgos asociados al consumo y uso del agua dependen de la salud basal de la población y de la composición química y microbiológica del agua que deriva del origen del agua, de las técnicas e infraestructuras para la extracción, aprovechamiento y suministro. La influencia del carácter volcánico de los recursos subterráneos así como el estado de estas instalaciones determinan la calidad del agua suministrada, siendo Tenerife la isla más afectada. La presencia de fluoruro, actividad alfa, sodio o aluminio derivados de la naturaleza volcánica del subsuelo y gestión de captaciones y su tratamiento determina la calificación sanitaria de las muestras de agua de consumo humano analizadas (afectando a más del 25% de las determinaciones) con diferentes repercusiones para la salud de los usuarios.

Palabras clave: *agua subsuelo volcánico, calidad química.*

ABSTRACT

Access to safe drinking water is a major determinant of health. Having quality water in sufficient quantity is considered the most important biomedical advance of the past two centuries, for the efforts, the incorporation of technologies and the introduction of information systems, such as the National Information System on Water Consumption (SINAC). The risks associated with the use of drinking-water depend on the population health and chemical and microbiological composition of water derived from the water source, techniques and facilities for the collection, use and supply. The influence of volcanic character of groundwater resources and the status of these facilities determine the quality of water supplied, being the most affected Tenerife Island. The presence of fluoride, alpha activity, sodium or aluminum derived from the volcanic nature of the subsoil and management of catchments and treatment determines the health status of samples of drinking water analyzed (affecting more than 25% of the determinations) with different implications for the

health of users.

Key words: *volcanic subsoil water chemical quality*

INTRODUCCIÓN

Según dispone el Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios de la calidad del agua de consumo humano (Ministerio de la Presidencia, 2003), el control de la calidad del agua de consumo humano se sustenta en tres pilares básicos: el autocontrol (responsabilidad del gestor del abastecimiento sea público, privado o mixto), el control en grifo del consumidor (responsabilidad de la administración local) y la vigilancia sanitaria (responsabilidad de la Administración Sanitaria Autonómica). Tanto los datos resultantes de este control de la calidad como la información relativa a los abastecimientos y sus infraestructuras tienen que estar permanentemente actualizados en el SINAC.

La norma supuso grandes cambios en materia de agua de consumo humano entre los que podemos destacar una mayor profesionalización del sector, la introducción de la zona de abastecimiento como unidad de gestión y control (ya utilizada en Canarias desde 1993), la incorporación de nuevos puntos de muestreo, análisis, parámetros, requisitos para los laboratorios, la elaboración y publicación de un programa de vigilancia sanitaria en la Comunidad Autónoma y la obligatoriedad de notificación de información al SINAC para los todos los intervinientes, desde el origen hasta el grifo del consumidor (Dirección General de Salud Pública del Servicio Canario de la Salud, 2008; Ministerio de Sanidad, 2005).

En este trabajo se expone la situación de la Comunidad Autónoma de Canarias en cuanto a implementación y cumplimiento de la normativa nacional y autonómica, centrándonos en la influencia de los recursos hídricos en la calidad del agua suministrada a la población, haciendo especial mención a las islas en las que el origen subterráneo es mayoritario, y en la contaminación química natural a que da lugar, especialmente en la isla de Tenerife.

El origen volcánico del subsuelo y la actividad volcánica residual en Tenerife afectan a la composición de las aguas subterráneas de manera diferenciada. La emanación de gases y las altas temperaturas en el subsuelo volcánico (40-42ºC), aportan elementos minerales en distintas cantidades. Así se incorpora por ejemplo el fluoruro proveniente tanto de la disolución de minerales como de las emanaciones de HF, el sodio, el aluminio y otros elementos también están presentes en concentraciones significativamente elevadas dando lugar a incumplimientos de los valores máximos establecidos en la normativa.

METODOLOGÍA

En este trabajo se recogen y presentan los datos relativos a la calidad del agua de consumo humano correspondientes al año 2012 en Canarias, y en la isla de Tenerife de forma particular, notificados por las entidades gestoras (públicas, mixtas o privadas) de los abastecimientos y por la administración sanitaria autonómica y local en el SINAC, fuente de información para obtener los datos que se exponen.

El Sistema de Información Nacional de Agua de Consumo (SINAC), que desde 2003 es una aplicación Web, es una aplicación donde los usuarios profesionales introducen, a tiempo real, datos sobre las características de las infraestructuras del abastecimiento, de laboratorios de control de agua, inspecciones sanitarias y de calidad del agua de consumo. La unidad de información es la zona de abastecimiento, o área geográficamente definida y

censada por la autoridad sanitaria a propuesta del gestor del abastecimiento o partes de este, no superior al ámbito municipal, en la que el agua de consumo humano proviene de una o varias captaciones y cuya calidad en las aguas distribuidas puede considerarse homogénea en la mayor parte del año. Una Zona de Abastecimiento (ZA) debe estar compuesta por las infraestructuras que van desde una o varias captaciones hasta el grifo del consumidor (Dirección General de Salud Pública del Servicio Canario de la Salud, 2008).

Para agregar los datos se ha utilizado ALDAGUA (Almacén de Datos de Agua). Este sistema también está basado en una aplicación Web. Ambos sistemas son administrados por el Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad.

Una vez extraída la información tabulada de SINAC y ALDAGUA, se han utilizado hojas de cálculo para los gráficos y tratamiento de textos.

RESULTADOS

El 54.4% de los municipios ha optado por la gestión indirecta del abastecimiento a través de la concesión del servicio a una empresa gestora (privada o mixta). El resto (45.5%) continúan gestionando el abastecimiento de agua de consumo humano de forma directa. En la Figura 1 se representan estos datos en el territorio de la Comunidad Autónoma.

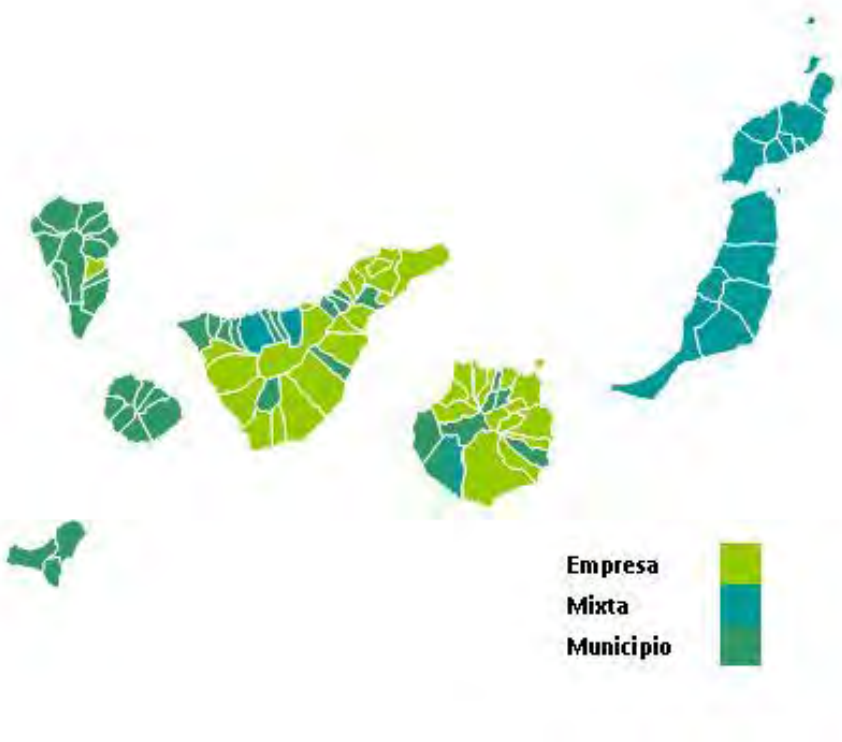


Figura 1: Forma de gestión de los abastecimientos en la Comunidad Autónoma de Canarias (SINAC, Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad).

Canarias cuenta con un total de 612 zonas de abastecimiento distribuidas por Islas según se observa en la Figura 2.

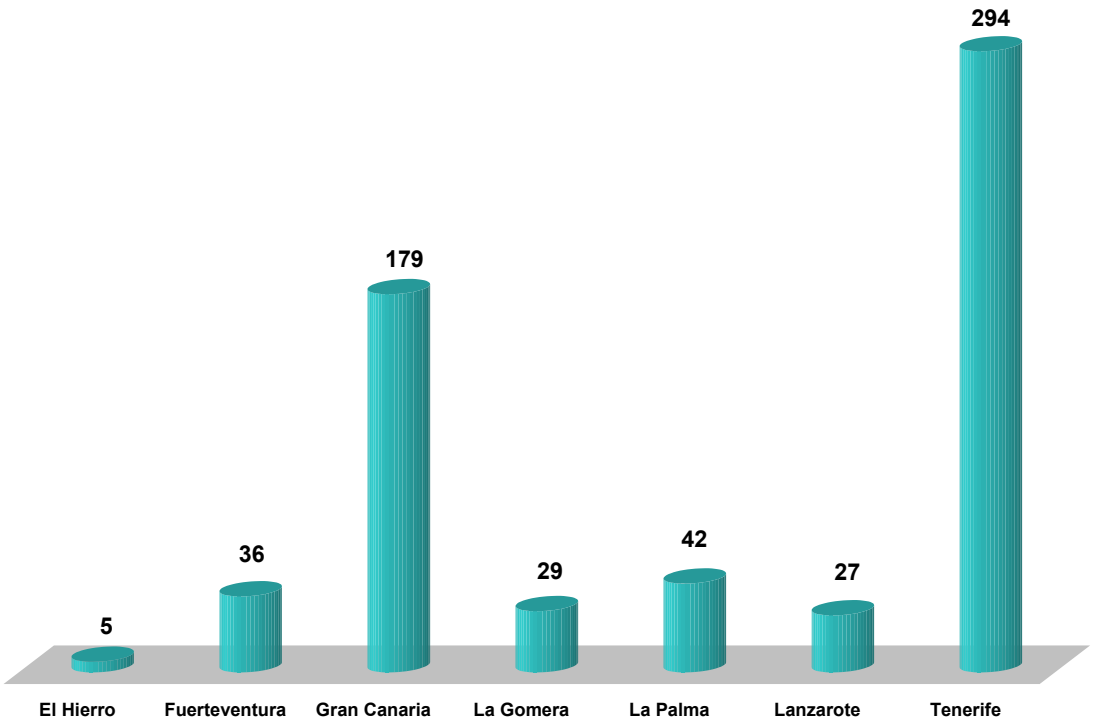


Figura 2: Distribución del número de zonas de abastecimiento por Isla.

En la Figura 3 se representan el número de instalaciones de los abastecimientos.

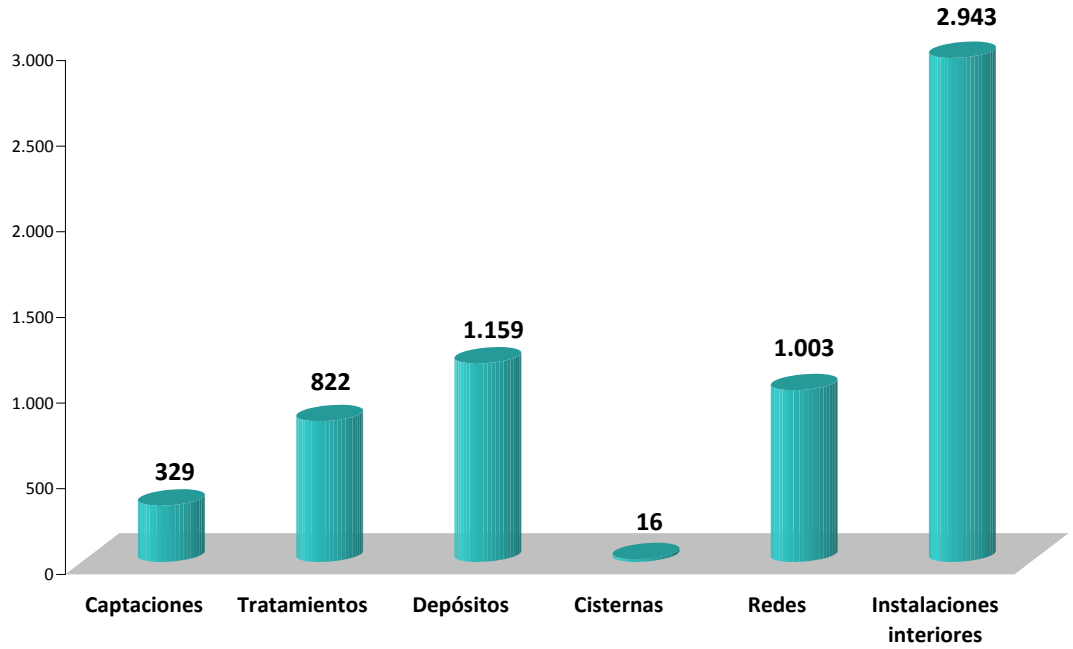


Figura 3: Número de captaciones, tratamientos, depósitos, redes e instalaciones interiores notificadas al SINAC en Canarias.

Se han comunicado más de 300.000 boletines de análisis de los que 105.174 se

corresponden a la isla de Tenerife. Estos boletines de análisis se corresponden con lo dispuesto en el artículo 18 y anexo V del Real Decreto 140/2003. El número de boletines por abastecimiento, la periodicidad de análisis y el contenido en parámetros están determinados en la misma norma, así como en el Programa de Vigilancia Sanitaria de la Comunidad Autónoma de Canarias.

Cada muestra es calificada sanitariamente en cuatro categorías posibles, en función de los parámetros que superen el valor paramétrico establecido en la normativa de aplicación: agua apta para el consumo (cuando no se incumple ningún parámetro); agua apta para el consumo con no conformidad (cuando se incumple algún parámetro indicador); agua no apta para el consumo (cuando se incumple algún parámetro microbiológico o químico); y agua no apta para el consumo y con riesgos para la salud (cuando la concentración alcanzada para un parámetro supone un peligro para la salud de la población consumidora).

La conformidad de los resultados en Tenerife se resume en la Figura 4 para parámetros químicos.

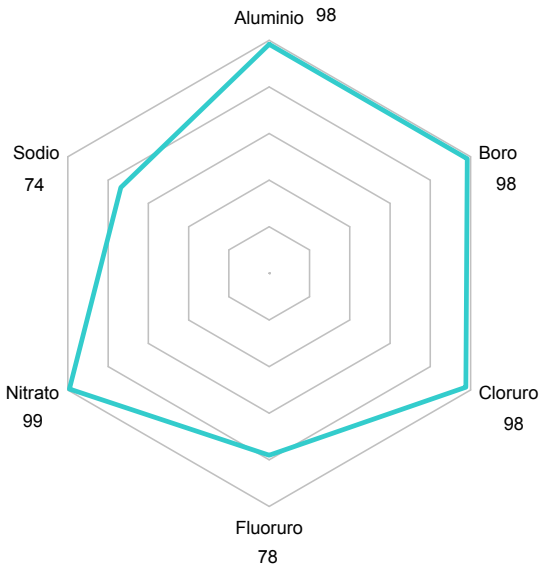


Figura 4: Porcentaje de determinaciones conformes según los resultados de los análisis de agua de consumo humano en Tenerife.

Con excepción del nitrato y el boro todas las determinaciones con incumplimientos provienen de muestras de agua de origen subterráneo de subsuelo volcánico. En la Figura 5 se ha representado la distribución del origen del agua utilizada para la producción de agua de consumo humano en la Comunidad Autónoma.

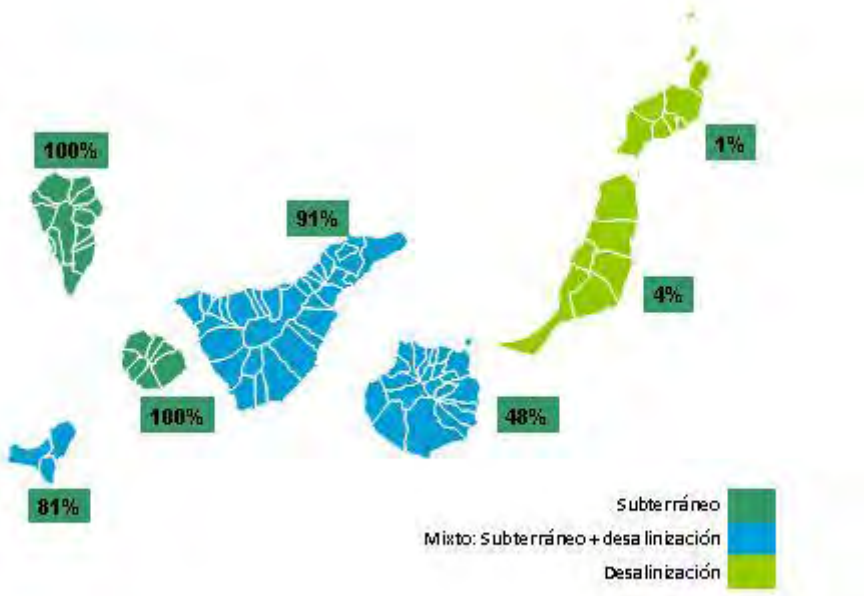


Figura 5: Porcentaje de origen subterráneo para la producción de agua de consumo humano en Canarias.

CONCLUSIONES

Las alteraciones de la calidad química del agua de consumo humano en la isla de Tenerife están relacionadas con la utilización de recursos hídricos subterráneos para la producción de agua de consumo humano.

Los parámetros mayormente afectados son fluoruro, sodio y en menor medida aluminio, asociados directamente a la utilización de recursos hídricos dependientes de subsuelos volcánicos.

Esta situación no se detecta en ninguna otra isla del Archipiélago Canario que utilice este tipo de recursos para el abastecimiento de la población.

La subsanación de la situación requiere de la aplicación de tratamientos de ámbito insular toda vez que están afectados numerosos municipios.

REFERENCIAS

Ministerio de la Presidencia (2003). Boletín Oficial del Estado núm. 45, de 21 de febrero de 2003: 7228-7245.

Ministerio de Sanidad y Consumo (2005). Orden SCO/1591/2005, de 30 de mayo, sobre el Sistema de Información Nacional de Agua de Consumo. Boletín Oficial del Estado 2005; 131: 18475-18478.

Consejería de Sanidad. Servicio Canario de la Salud. Dirección General de Salud Pública. Resolución de 27 de junio de 2008, por la que se aprueba el programa de vigilancia sanitaria del agua de

consumo humano de la Comunidad Autónoma de Canarias. Boletín Oficial de Canarias, 2008; 224: 21881.
http://www2.gobiernodecanarias.org/sanidad/scs/contenidoGenerico.jsp?idDocument=c7deec59-13b4-11de-9adc-e374ef74e50a&idCarpeta=0428f5bb-8968-11dd-b7e9-158e12a49309

ISBN: 978-84-938046-4-0

RESISTENCIA A ANTIBIÓTICOS EN BACTERIAS AISLADAS DE MUESTRAS DE AGUA EN GRAN CANARIA Y SU RELACIÓN CON LA PRESENCIA DE CONTAMINANTES EMERGENTES

María Teresa TEJEDOR-JUNCO[1], Margarita GONZÁLEZ MARTÍN[1], Pablo LUPIOLA GÓMEZ[1], Esmeralda ESTÉVEZ[2], María del Carmen CABRERA[2] y Sarah MONTESDEOCA ESPONDA[3]

[1]Departamento de Ciencias Clínicas (Microbiología). Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Apartado de Correos 550, 35080 Las Palmas de Gran Canaria, España.
mariateresa.tejedor@ulpgc.es ; margaritarosa.gonzalez@ulpgc.es ; plupiola@dcc.ulpgc.es
[2] Departamento de Física. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 35017 Las Palmas de Gran Canaria, España, mcarmen.cabrera@ulpgc.es; eestevez@proyinves.ulpgc.es
[3]Departamento de Química. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 35017 Las Palmas de Gran Canaria, España. smontesdeoca@becarios.ulpgc.es

RESUMEN

Hemos analizado la posible relación entre la presencia de contaminantes emergentes en agua regenerada para riego, agua del lixiviado dell suelo y agua subterránea y la resistencia a antibióticos de las bacterias aisladas. Se tomaron muestras de agua (galería, solución de suelo, pozo y riego). Cada muestra se dividió en dos partes. Una se centrifugó y se resembró en diferentes medios. Cincuenta mililitros de la segunda parte se añadieron a Caldo Brain Heart. En la siembra directa de agua de riego y solución del suelo se detectaron numerosas colonias. El crecimiento en la siembra directa de agua de galería fue escaso, y no hubo crecimiento cuando se sembró agua de pozo. Mediante enriquecimiento en Caldo BHI y resiembra posterior, se obtuvieron numerosas colonias en todos los medios y muestras. Encontramos dos géneros de Gram positivos (*Enterococcus* y *Staphylococcus*). La mayoría de las cepas presentaba una sensibilidad alta a antibióticos. En agua de riego se aisló una cepa de *Enterococcus* resistente a todas las quinolonas ensayadas. Entre los bacilos Gram negativos, encontramos diversos géneros de Enterobacterias y otros géneros (*Vibrio* y *Pseudomonas*). Aparece un elevado porcentaje de cepas resistentes a la combinación Amoxicilina + Ácido Clavulánico. No parece haber correlación con la presencia de otros contaminantes emergentes, aunque sería necesario analizar un mayor número de muestras.

Palabras clave: *Antibióticos, Resistencia, Contaminantes emergentes.*

ABSTRACT

We have analyzed the possible relationship between the presence of emerging contaminants in reclaimed irrigation water, soil water and groundwater and antibiotic resistance of the isolated bacteria. Water samples were taken. Each sample was divided

into two parts. One was centrifuged and cultured in different media. Fifty milliliters of the second part was added to Brain Heart Broth. In direct culture of irrigation water and soil solution, numerous colonies were detected. When gallery water was directly cultured, growth was scarce, and no growth was observed when well water was directly cultured. By BHI broth enrichment and subsequent plating, numerous colonies were obtained in all media and samples. We found two kinds of Gram positive (*Staphylococcus* and *Enterococcus*). Most of the strains have a high sensitivity to antibiotics. In irrigation water, an *Enterococcus* strain resistant to all quinolones tested was isolated. Among the Gram negative bacilli, we found different genera belonging to *Enterobacteriaceae* and other genera (*Vibrio* and *Pseudomonas*). A high percentage of strains were resistant to Amoxicillin + Clavulanic acid combination. It seems that there is no correlation among resistance and the presence of emerging contaminants, although it would be necessary to analyze a larger number of samples.

Key words: *Antibiotics, Resistance, Emerging contaminants.*

INTRODUCCIÓN

Los compuestos emergentes son contaminantes que aún no están contemplados por la legislación y cuyos efectos adversos no se conocen con exactitud (Petrovic et al., 2004). El consumo de distintos compuestos considerados emergentes, como por ejemplo fármacos y productos de cuidado personal, se sitúa en miles de toneladas cada año, incorporándose a las aguas medioambientales por diversas vías, entre las que destacan las aguas residuales que no son adecuadamente tratadas en las estaciones depuradoras (Montesdeoca-Esponda et al., 2014a).

En Gran Canaria, la reutilización de aguas depuradas para riego es una práctica habitual desde hace más de treinta años, dada la escasez de recursos hídricos que existe en la isla (Marrero y Palacios, 1996). El programa CONSOLIDER-TRAGUA, desarrollado entre 2009 y 2013, ha tenido como objetivo en Gran Canaria la evaluación de la afección al acuífero de la reutilización de aguas regeneradas. Los trabajos del programa incluyeron la determinación de contaminantes emergentes en muestras ambientales de agua de diversos orígenes, cuyos resultados son objeto de otra comunicación en este mismo Workshop (Montesdeoca-Esponda et al, 2014b).

La relación entre diversos contaminantes emergentes y la resistencia bacteriana a antibióticos ha sido descrita por diversos autores. Pumbwe et al. (2007) demostraron la relación entre la presencia de compuestos con anillo benceno (como el ibuprofeno) y la aparición de cepas de *Bacteroides* multirresistentes. Por ello, a partir de los resultados de emergentes obtenidos en la zona de estudio, se planteó la necesidad de contrastar sus niveles con la existencia de bacterias resistentes a diversos antimicrobianos. Las determinaciones realizadas en este sentido son objeto de la presente comunicación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización de la zona de muestreo

Como zona de muestreo se seleccionó el acuífero subyacente al Campo de Golf de Bandama, situado en la Cuenca de Las Goteras, entre los 400 y los 500 m de altura al NE de Gran Canaria. El riego del campo de golf se ha realizado con agua depurada de la E.D.A.R. de la ciudad de Las Palmas de Gran Canaria desde 1976 (Figura 1).

El flujo subterráneo en la zona de estudio tiene lugar de cumbre a costa, siguiendo el esquema general para la isla. La piezometría permite identificar la existencia de un camino preferencial por el Barranco de Las Goteras y de una línea de flujo entre el campo de golf y dicho barranco. El nivel piezométrico se sitúa a unos 250 m por debajo del campo de golf y a unos 100 m del fondo de la Caldera (Estévez et al., 2012) (Figura 1).

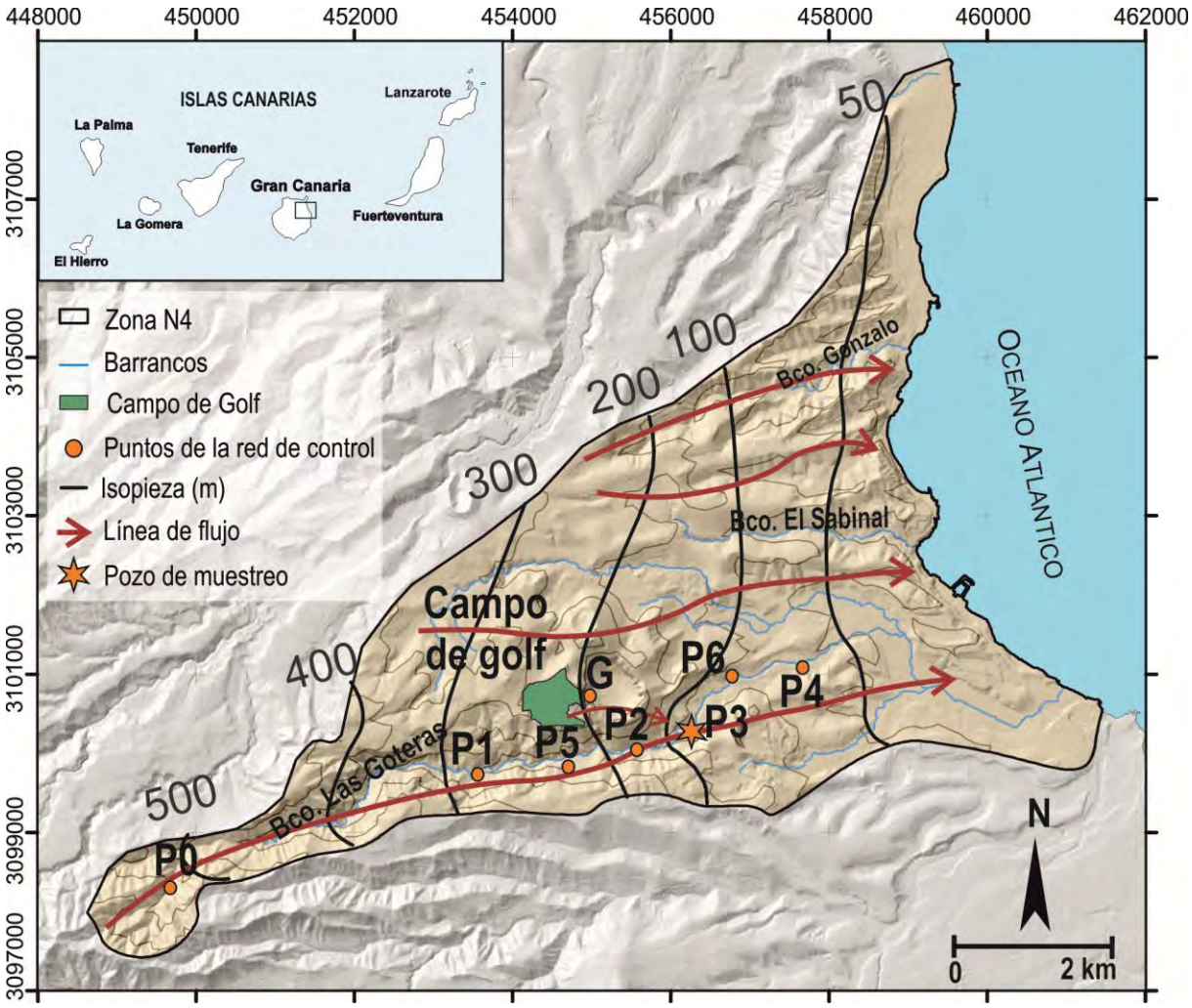


Figura 1. Localización del área de estudio. Se indican los puntos de muestreo pertenecientes a la red de control trimestral para la determinación de contaminantes emergentes y la piezometría de la Cuenca de Las Goteras.

En la zona se instaló una red de control que se muestreó trimestralmente durante 2009 para la determinación de contaminantes emergentes seleccionados (Montesdeoca-Esponda et al., 2014b).

La situación de los puntos de agua subterránea pertenecientes a la red de control se recoge en la Figura 1. Se trata de pozos tradicionales canarios, con diámetros entre 2,5 y 3 m, profundidades entre 15 y 300 m y caudales medios diarios inferiores a 1 Ls^{-1}. Se ha muestreado también una galería de agua de unos 40 m de profundidad situada en la pared de la Caldera de Bandama, a unos 60 m por debajo del campo de golf. La galería drena un acuífero colgado, con un caudal constante de unos 0,05 Ls^{-1} e integra el agua de los retornos de riego del campo de golf de Bandama.

Análisis Microbiológicos

Se tomaron cuatro muestras de agua: agua de riego, lixiviado del suelo, galería de agua y pozo. El agua de riego se tomó directamente en una toma del campo de golf, el lixiviado del suelo se tomó en un lisímetro instalado en el mismo campo de golf, el agua de la galería se tomó de un estanque en que se almacena el agua y el agua de pozo se muestreó después de un bombeo suficientemente prolongado para evitar el estancamiento. Las muestras se conservaron en nevera y se trasladaron al laboratorio antes de cuatro horas. Cada muestra se dividió en dos partes. La primera se centrifugó para sedimentar los posibles microorganismos y el sedimento se sembró en diferentes medios (Agar Brain-Heart; Agar Cled, Agar McConkey, Agar *Salmonella-Shigella*, Agar con Sal y Manitol y Agar Verde Brillante). Cincuenta mililitros de la segunda parte se añadieron a 50 mL de Caldo Brain-Heart y se resembraron posteriormente en los medios descritos. Todos los medios se incubaron a 37ºC durante 24 horas.

Se llevó a cabo la tinción de Gram. Los cocos Gram positivos se identificaron mediante presencia /ausencia de catalasa y, si procede, de coagulasa. En el caso de los Bacilos Gram negativos, se llevó a cabo la prueba de la oxidasa y se identificaron mediante los sistemas API 20E y 20NE (BioMerieux, Francia).

El estudio de la sensibilidad a antibióticos se llevó a cabo mediante antibiograma en medio de Müeller-Hinton. Los antibióticos utilizados para Gram positivas fueron: Ciprofloxacina (CIP), Enrofloxacina (ENRO), Levofloxacina (LEVO), Norfloxacina (NOR), Penicilina (P), Ampicilina (AM), Vancomicina (VAN) y Teicoplanina (TE). Para los Bacilos Gram negativos, los antibióticos ensayados fueron: Ciprofloxacina, Enrofloxacina, Levofloxacina, Norfloxacina, Ceftazidima (CAZ), Cefotaxima (CTX), Cefuroxima (CXM) y Amoxicilina + Ácido Clavulánico (AMOX/CLAV).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de los estudios de identificación y sensibilidad a antibióticos se muestran en las Tablas 1 y 2.

En la siembra directa se detectaron numerosas colonias en los diversos medios para el agua de riego y solución de agua del suelo (tomado en el lisímetro). El crecimiento en la siembra directa de agua de galería fue escaso, y no hubo crecimiento en ninguno de los medios cuando se sembró agua de pozo. Al realizar un enriquecimiento en Caldo BHI durante 24 horas, y llevar a cabo una resiembra posterior, se observaron numerosas colonias en todos los medios y en todas las muestras.

Se aislaron dos géneros de Gram positivos (*Enterococcus* y *Staphylococcus)* (Tabla 1). En general presentan una sensibilidad alta a antibióticos. Dentro de las bacterias Gram positivas de interés clínico aisladas, las cepas R1 y G1 pertenecen al género *Enterococcus* y las cepas G7, G8 y G9 pertenecen al género *Staphylococcus*. Destaca la presencia en agua de riego de una cepa de *Enterococcus* resistente a todas las quinolonas ensayadas. Las restantes cepas bacterianas no se incluyen inicialmente en los géneros aislados en muestras clínicas.

Los bacilos Gram negativos (Tabla 2) se identificaron mediante los sistemas API 20E y 20NE (BioMerieux, Francia). Encontramos diversos géneros de Enterobacterias (*Klebsiella*, *Enterobacter*, *E. coli*, *Citrobacter*, *Proteus* y *Serratia*) así como bacterias pertenecientes a otras Familias (*Vibrio* y *Pseudomonas*).

Tabla 1. Estudio de sensibilidad de los bacilos Gram positivos aislados.

Cepa	Género	CIP	ENRO	LEVO	NOR	P	AM	VAN	TE
G1	*Enterococcus*	R	R	S	I	S	S	S	S
G2	NI	S	S	S	I	R	R	S	S
G7	*Staphylococcus*	S	S	S	S	S	S	S	S
G8	*Staphylococcus*	S	S	S	S	S	S	S	S
G9	*Staphylococcus*	S	S	S	S	R	R	S	S
P1	NI	S	S	S	S	R	R	S	S
P2	NI	S	S	S	S	R	R	S	S
R1	*Enterococcus*	R	R	R	R	S	S	S	S

G = Agua de Galería.
L = Agua de Lisímetro.
P = Agua de Pozo.
R = Agua de Riego

S= sensible
R= resistente
I= intermedio
NI: identificación insuficiente con las técnicas empleadas

En cuanto a la sensibilidad a antibióticos, aparece un elevado porcentaje de cepas resistentes a la combinación Amoxicilina + Ácido Clavulánico (12 de 18 incluyendo las de sensibilidad intermedia, 66,6%), lo que puede deberse a su uso frecuente en la población.

Los resultados de los muestreos de contaminantes emergentes revelaron la presencia de todos los analitos seleccionados en concentraciones entre 15 y 150 $ng \cdot L^{-1}$, a excepción de la permetrina. Los compuestos más frecuentemente encontrados fueron nicotina y cafeína, con concentraciones de hasta 150 $ng \cdot L^{-1}$ y de manera constante durante todo el año. Atenolol y paraxantina también fueron detectados en todos los muestreos pero en menores concentraciones. Metamizol y fluoxetina sólo se detectaron de manera puntual (Montesdeoca-Esponda et al., 2014b)

Otros estudios realizados en aguas subterráneas han demostrado la presencia de concentraciones relevantes de contaminantes emergentes en muestras ambientales de agua: entre 10 y 100 $ng \cdot L^{-1}$ (sulfonamidas, trimetoprim, fluoroquinolonas, tetraciclinas, macrólidos y cafeína) (Batt y Aga, 2005), 54 $ng \cdot L^{-1}$ (quinolonas y penicilinas) (Pozo *et al.*, 2006) y entre 46 y 215 $ng \cdot L^{-1}$ (sulfonamidas) (Batt et al., 2006). Estévez et al., 2012 procedieron en esta misma zona de estudio a la determinación de 183 compuestos en agua de riego regenerada y agua subterránea de la zona, de los que se detectaron un 43%: 42 productos farmacéuticos, 20 pesticidas, 12 hidrocarburos poliaromáticos, 2 volátiles orgánicos y 2 retardantes de llama. Los compuestos más frecuentes fueron cafeína, nicotina, clorpirifos etil, fluoreno, fenantreno y pireno.

Tabla 2. Estudio de sensibilidad de los bacilos Gram negativos aislados.

Cepa	Especie	CIP	ENRO	LEVO	NOR	CAZ	CTX	CXM	AMOX/ CLAV
G3	*Pseudomonas (Flavibacterium) oryzihabitans*	S	S	S	S	S	S	R	S
G4	*Escherichia coli*	S	S	S	S	S	S	S	S
G5	*Klebsiella pneumoniae subsp. pneumoniae*	S	S	S	S	S	S	S	S
G6	*Enterobacter sakazakii*	S	S	S	S	S	S	S	R
L1	*Pseudomonas aeruginosa*	S	R	S	S	S	I	R	R
L2	*Proteus mirabilis*	S	R	S	S	S	I	R	R
L3	*Citrobacter freundii*	S	S	S	S	S	S	S	R
L4	*Serratia marcescens*	S	S	S	S	S	S	R	R
L5	*Pseudomonas aeruginosa*	S	R	S	S	S	I	R	R
L6	*Citrobacter freundii*	S	S	S	S	S	S	S	R
P3	*Vibrio metschnikovii*	S	R	S	I	S	S	S	R
P4	*Escherichia coli*	S	R	S	I	S	S	S	R
P5	*Vibrio metschnikovii*	I	R	S	I	S	S	S	R
R2	*Pseudomonas aeruginosa*	S	R	S	S	S	I	R	I
R3	*Klebsiella oxytoca*	I	I	S	S	S	I	I	I
R4	*Klebsiella ornithinolytica*	S	S	S	S	S	I	S	S
R5	*Enterobacter sakazakii*	S	S	S	S	S	S	S	S
R6	BNF	S	S	S	S	S	S	S	S

G = Agua de Galería.
L = Agua de Lisímetro.
P = Agua de Pozo.
R = Agua de Riego

S= sensible
R= resistente
I= intermedio
BNF: bacilo no fermentador, identificación insuficiente con las técnicas empleadas

En los estudios realizados en la zona (Estévez et al., 2012; Montesdeoca-Esponda et al., 2014b), se indica que no es posible establecer un origen unívoco de los contaminantes emergentes en el acuífero a partir de la reutilización de aguas regeneradas, toda vez que las aguas subterráneas integran aguas procedentes de varios orígenes, como las fosas sépticas situadas a lo largo del barranco, las roturas en la red de saneamiento y los retornos de riego con aguas regeneradas en pequeñas explotaciones agrícolas de la zona. No se ha observado correlación entre la presencia de contaminantes emergentes y resistencia a antibióticos. Sin embargo, consideramos destacable la presencia de *Enterococcus*

resistentes a quinolonas en muestras ambientales de agua así como el elevado número (12 de 18) de Bacilos Gram negativos resistentes a Amoxicilina + ácido Clavulánico.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca en el Programa CONSOLIDER-TRAGUA (CSD2006-00044) y ha sido financiado en parte por las Redes de Excelencia de la ULPGC a través de la Acción Incipiente "Presencia de contaminantes emergentes en aguas regeneradas y subterráneas de la isla de gran canaria y su relación con la resistencia bacteriana. Taxonomia/clasificación de aguas usando redes neuronales artificiales". Se agradece su apoyo al Real Club de Golf de Las Palmas y a los propietarios de los pozos y la galería.

REFERENCIAS

Batt, A.L. y Aga, D.S. (2005). *Simultaneous analysis of multiple classes of antibiotics by ion trap LC/MS/MS for assessing surface water and groundwater contamination.* Analytical Chemistry 77: 2940-2947.

Batt, A.L.; Snow, D.D. y Aga, D.S. (2006). *Occurrence of sulfonamide antimicrobials in private water wells in Washington County, Idaho, USA.* Chemosphere, 64: 1963-1971.

Estévez, E.; Cabrera, M.C.; Molina-Díaz, A.; Robles-Molina, J. y Palacios-Díaz, M.P. (2012). *Screening of emerging contaminants and priority substances (2008/105/EC) in reclaimed water for irrigation and groundwater in a volcanic aquifer (Gran Canaria, Canary Islands, Spain).* Science of the Total environment, 433, 538-546.

Marrero, A. y Palacios, M.P. (1996).*Depuración y reutilización de aguas en Gran Canaria. Ed. Consorcio Insular de Aprovechamiento de Aguas Depuradas de Gran Canaria,* Las Palmas de Gran Canaria, 55 pp.

Montesdeoca-Esponda, S.; Mahugo-Santana, C.; Sosa-Ferrera, Z. y Santana-Rodríguez, J.J. (2014). *A dispersive liquid–liquid micellar microextraction for the determination of pharmaceutical compounds in wastewaters using ultra-high-performace liquid chromatography with DAD detection.* Biomedical Chromatography, (wileyonlinelibrary.com) DOI 10.1002/bmc.3282.

Montesdeoca-Esponda, S.; Estévez, E.; Cabrera, M.C.; Sosa-Ferrera, Z. y Santana-Rodríguez, J.J. (2014). *Determinación de contaminantes emergentes en aguas subterráneas del Noreste de Gran Canaria.*II Workshop "Estudio, aprovechamiento y gestión del agua en terrenos e islas volcánicas" (en prensa)

Petrovic l arrat ope de lda y arcel Endocrine disrupting compounds and other emerging contaminants in the environment: A survey on new monitoring strategies and occurrence data. Analytical and Bioanalytical Chemistry 378: 549-562.

Pozo, O.J.; Guerrero, C.; Sancho, J.V.; Ibáñez, M.; Pitarch, E.; Hogendoorn, E. y Hernández, F. (2006). Efficient approach for the reliable quantification and confirmation of antibiotics in water using on-line solid-phase extraction liquid chromatography/tandem mass spectrometry. Journal of Chromatography A 1103: 83-93.

Pumbwe L., Skilbeck C.A. y Wexler H.M. (2007). *Induction of multiple antibiotic resistance in Bacteroides fragilis by benzene and benzene-derived active compounds of commonly used analgesics, antiseptics and cleaning agents.* Journal of Antimicrobial Chemotherapy 60, 1288–1297.

ISBN: 978-84-938046-4-0

LA VUELTA AL MUNDO A TRAVÉS DE OCHENTA ETIQUETAS DE AGUA EMBOTELLADA

Fernando Andrés OJEDA PÉREZ

Máster en Gerencia de Empresas Agroalimentarias, coleccionista de etiquetas, análisis y libros de aguas embotelladas y balnearios. Telde. thalassojeda@gmail.com

RESUMEN

Gran Canaria, es la isla con mayor número de captaciones subterráneas y empresas comercializadoras de agua embotellada, en el archipiélago Canario. Hacia principios del siglo XX, comienza el desarrollo de esta industria. Embotellando aguas clasificadas como minero-medicinales. Transcurridos casi cien años, de las primeras marcas; en la actualidad, la proliferación de marcas peninsulares y europeas siguen incrementando la colección...

Indudablemente, el uso de agua engarrafada para cocinar, embotellada para consumo directo. Y ser las islas Canarias, destino turístico de primera magnitud. Son parámetros que favorecen tal tendencia al alza.

Esta comunicación pretende dar una visión de las marcas propias de las islas, así como del resto del mundo. Realizaremos un viaje figurado con itinerario marcado alrededor del Globo, mediante la selección de un total de 80 etiquetas. Ellas nos ilustrarán sobre distintas composiciones de aguas subterráneas así como de los procesos industriales utilizados para purificación y/o aporte de minerales, de otras aguas de procedencias diversas.

La lectura del etiquetado nos ilustrará de tendencias recurrentes de las grandes comercializadoras. Incluso composiciones químicas en algunos casos. También en las procedentes de lugares lejanos, un variopinto catálogo de tecnologías de esterilización y purificación.

ORGANIZACIÓN:

EDICIÓN:

PATROCINADORES Y COPATROCINADORES:

COLABORADORES: