

## **Evolución geológica del Archipiélago Canario (1981-2016)**

**Dr. Juan Carlos Carracedo Gómez**

Profesor de Investigación del Consejo Superior de Investigaciones Científicas retirado  
Investigador emérito asociado del Departamento de Física  
de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

Texto del discurso de ingreso como Académico de Número de la  
Real Academia Canaria de Ciencias, pronunciado el 17 de diciembre de 2015

Sr. Presidente  
Sres. Académicos  
Señoras y señores:

Acepto agradecido, pero con cierta preocupación, presentarme ante ustedes para recibir este importante reconocimiento como académico que no estoy seguro de merecer. Lo único que puedo aportar a mi favor es que, a punto de alcanzar mi segunda jubilación próximo a cumplir 75 años, aún conservo intacta la ilusión y la tenacidad que he mantenido durante toda una vida centrada en la investigación de los procesos geológicos de este planeta, orientados fundamentalmente al estudio de la génesis y evolución de las islas volcánicas oceánicas, muy particularmente las Canarias.

Cuando reflexiono sobre mi vida pienso que he sido muy afortunado, tanto personal como profesionalmente. Un adagio chino, más bien una maldición, dice “que te toque vivir en tiempos interesantes”, aludiendo a que es mejor vivir en tiempos de calma que en los de crisis. Sin embargo en el mundo de la ciencia es todo lo contrario. Afortunadamente a mí me tocó vivir desde el inicio la mayor revolución experimentada en el campo de la geología, tiempos críticos en que esta ciencia pasó de ser interpretativa y poco creíble al explicar los grandes procesos geológicos de la Tierra (la formación de los océanos, de las grandes cordilleras, de las islas oceánicas, el origen de los terremotos y los volcanes), a un modelo global que permitía esa explicación coherente e, incluso en muchos casos, su cuantificación y predicción. De hecho, tuve la fortuna de estar en esa época con una estancia de postgrado en la Universidad de Toronto, la zona cero de la tectónica de placas y los modelos de formación de las islas oceánicas, en gran parte enunciadas por Tuzo Wilson, profesor y director de uno de los departamentos de esa universidad.

En una de aquellas conferencias, absolutamente revolucionarias, especialmente para mí, fue cuando tuve la idea de aplicar este nuevo modelo en la tesis doctoral que me propuse firmemente realizar sobre la formación de las Islas Canarias. Cuando regresé a

Canarias en 1971 la fortuna o el azar me permitió participar en el seguimiento de mi primera erupción volcánica, la del volcán Teneguía, en el equipo del Profesor Fúster. Ante tal predestinación no me quedó otra que proponerle a Fúster la realización de una tesis doctoral con el proyecto ya ideado y lo demás fue seguir el camino hasta hoy.

Creo en la Ciencia con mayúsculas, no sólo como una honrosa forma de ganarse la vida, sino con el anhelo y la esperanza de aportar algo nuevo a la ciencia. Me siento afortunado de haber trabajado en el campo científico, el único que persigue la verdad. Porque la verdad científica es la única verdad verificable, y lo es por sus resultados, siempre sujetos a revisión. A diferencia de la “verdad” religiosa, inmutable porque se cimenta en el dogma y requiere de la fe, o la “verdad” política, que se sustenta en el poder, la “verdad” científica sólo existe si puede demostrarse, no imponerse. Cualquier nuevo descubrimiento sacude todo el corpus científico, a veces en temas aparentemente lejanos. Esta constante duda es lo que hace de la certeza científica, por definición, la única verdad indudable.

Buscando este tipo de verdad nos está permitido a veces algo que parecería reservado sólo a los más preclaros científicos... el gozo del descubrimiento. En estas islas he disfrutado de la contemplación de la infinita complejidad y armonía de la Naturaleza que, en contadas ocasiones, me ha dejado entrever algunos de sus enigmas, tal vez menores, pero no por ello menos gratificantes. Así pues, en el campo de los agradecimientos, vaya por delante mi gratitud a estos enormes peñascos situados en medio del Atlántico, y a sus hospitalarios habitantes.

Y por supuesto, mi gratitud al Presidente y miembros de la Real Academia Canaria de Ciencias, por su decisión de ampliar el campo con una Sección de Geología, una parte de la ciencia incomprensiblemente relegada en Canarias, y proponerme para ser Académico Numerario en esa disciplina científica.

## **EVOLUCIÓN GEOLÓGICA DEL ARCHIPIÉLAGO CANARIO (1981-2016)**

El título de este discurso, con el que pretendo obtener el ingreso en la Real Academia Canaria de Ciencias, no es casual; es exactamente el mismo del discurso que presentó en 1981 el Profesor José María Fúster Casas para su ingreso en la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales<sup>1</sup>. Esta intencionada coincidencia tiene dos propósitos: por una parte intenta ser un sentido homenaje al Profesor Fúster, tal vez el científico que más ha contribuido al conocimiento de la geología de las Canarias, al iniciar, en la década de los 60 del pasado siglo, el primer estudio geológico moderno y detallado del conjunto de este archipiélago, al que dedicó, hasta su fallecimiento, justo al terminar el anterior milenio, la mayor parte de su investigación. Aún tienen plena vigencia las memorias publicadas en 1968 por Fúster y colaboradores de las islas de Tenerife<sup>2</sup>,

---

<sup>1</sup> Fúster, J.M., 1981. Evolución Geológica del Archipiélago Canario. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Madrid, 61 pp.

<sup>2</sup> Fúster, J.M., Araña, V., Brandle, J.L., Navarro, M., Alonso, U., y Aparicio, A., 1968. Geología y Volcanología de las Islas Canarias: Tenerife: Madrid, Instituto “Lucas Mallada”, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 218 p.

Fuerteventura<sup>3</sup>, Gran Canaria<sup>4</sup> y Lanzarote<sup>5</sup>. Tuve la fortuna de que fuera mi profesor de Petrología y director de tesis en la Complutense, y después un colaborador y amigo del que he intentado seguir sus pasos y su ejemplo.

El segundo objetivo es analizar, casi 35 años después, la evolución geológica del archipiélago canario, tan magistralmente sintetizada por Fúster en su discurso de 1981, lo que brinda la oportunidad de valorar los avances experimentados en estos años en el conocimiento geológico de las Canarias, una especie de foto fija de los avances logrados en este campo. Obviamente, este discurso está basado, en su mayor parte, en informaciones publicadas desde 1981, y por lo tanto conocidas, aunque también incluye algunos descubrimientos recientes significativos y aún poco conocidos. Ni que decir tiene que mi aportación es apenas un grano de arena en esa espaciosa playa de la investigación geológica de las Canarias.

## **APROXIMACIÓN HISTÓRICA AL AVANCE DEL CONOCIMIENTO GEOLÓGICO DE LAS ISLAS CANARIAS**

En el estudio de las Canarias existen dos etapas bien definidas, separadas por la irrupción de la tectónica de placas en la década de los 60, paradigma que revolucionó las Ciencias de la Tierra y una verdadera navaja suiza que ha sido utilizada en la solución de prácticamente todos los problemas geológicos y geofísicos esenciales. Esta revolucionaria teoría fue en gran parte formulada inicialmente por el geofísico americano Harry Hess, que logró publicar en 1962<sup>6</sup>, después de ser rechazado varias veces por especulativo y fantástico, un artículo científico que él mismo subtitó “un ensayo en geopoésia”<sup>7</sup>. Pues bien, esta geopoésia transformó la Geología en una ciencia moderna, si no exacta, porque ninguna ciencia lo es salvo las matemáticas, sí con capacidades de cuantificación y predicción. Como Thomas Kuhn indicó en su Estructura de las Revoluciones Científicas, la ciencia progresa por fases, cada una con un particular “paradigma”, que es simplemente la teoría que mejor explica los datos que se van descubriendo, ninguno más revolucionario en las Ciencias de la Tierra que la tectónica de placas.

La tectónica de placas llegó a España a principios de los 70, por lo que el estudio sistemático de las Canarias, iniciado a mediados de los 60, no contó al principio con este

---

<sup>3</sup> Fúster, J.M., Cendrero, A., Gastesi, P., Ibarrola, E., and López Ruiz, J., 1968. Geología y Volcanología de las Islas Canarias, Fuerteventura: Madrid, Instituto “Lucas Mallada,” Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 239 p.

<sup>4</sup> Fúster, J.M., Hernández Pacheco, A. Muñoz, M. Rodríguez Badiola, E. and García Cacho, L., 1968. Geología y Volcanología de las Islas Canarias: Gran Canaria. Instituto «Lucas Mallada», Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, 243 págs.

<sup>5</sup> Fúster, J.M.; Fernández Santín, S.; Sagredo, J., 1968. Geología y Volcanología de las Islas Canarias: Lanzarote. Instituto «Lucas Mallada», Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, 177 pp.

<sup>6</sup> Hess, H., 1962. History of ocean basins. In: Petrologic Studies: A Volume in Honor of A. F. Buddington, ed. by A. E. J. Engel, H. L. James. and B. F. Leonard, pp. 599-620. New York, Geological Society of America.

<sup>7</sup> Esta historia está excelentemente descrita en: Merrit, J. I., 1966. Hess's geological revolution . How an “essay in geopoetry” led to the new science of plate tectonics. <[www.princeton.edu/geosciences/about/publications/Harry\\_Hess\\_bop.pdf](http://www.princeton.edu/geosciences/about/publications/Harry_Hess_bop.pdf)>

valiosísimo instrumento. Esto explica que muchas cuestiones importantes no encontraran un adecuado enfoque o explicación. Y ninguna cuestión más relevante para nosotros que el propio origen de las Islas, que ha dado lugar a un encendido debate que sólo ahora parece haberse resuelto, como veremos más adelante.

Un error, cuya indudable trascendencia era de difícil apreciación en la época de los 60, fue iniciar el estudio del volcanismo de las Canarias por su extremo oriental, el más antiguo y, sobre todo, el más cercano al continente africano. Esta decisión, contraria por ejemplo a cómo se inició el estudio del volcanismo hawaiano, por la “isla grande” (Hawaii), la más reciente y la única actualmente activa, iba a tener consecuencias que llegaran hasta nuestros días, principalmente atribuir de forma injustificada una excesiva influencia del continente en el origen y desarrollo de las Islas, siendo así que éstas son construcciones volcánicas atlánticas, completamente independientes del continente, asentadas todas ellas sobre corteza oceánica.

Se preguntarán el porqué de las abundantes referencias que estoy haciendo y haré de las Islas Hawaii. Es cierto que las Canarias tuvieron un papel predominante en el desarrollo de la Geología y Volcanología en los siglos 18 y 19, e incluso en la primera mitad del siglo 20. En Canarias se resolvieron definitivamente importantes problemas que bloqueaban el desarrollo de estas ciencias, de forma importante la influencia de las creencias religiosas. Esto se hizo patente en la confrontación de neptunistas y plutonistas, disputa en la que intervinieron naturalistas tan insignes como Charles Lyell, del lado de los plutonistas, y Leopold von Buch y Alexander von Humboldt, que propugnaban ardientemente las creencias neptunistas, que defendían que los basaltos eran un precipitado en medio acuoso, evidentemente una explicación influida aún por las creencias bíblicas en el diluvio universal. Es una lección admirable que ambos neptunistas cambiaran radicalmente de bando al comprobar que las ideas neptunistas eran incompatibles con sus observaciones en Canarias.

En cualquier caso, el papel protagonista de las Canarias en el desarrollo de estas geociencias cesó poco después, iniciándose un largo periodo sin apenas dedicación ni avances, muy propio de la escasa atención que España ha dedicado tradicionalmente a la ciencia. Este vacío se llenó pronto con el traslado a las Islas Hawaii de las investigaciones volcanológicas, erigiéndose pronto esas islas como el nuevo protagonista, especialmente desde la creación en 1912 del Hawaiian Volcano Observatory del Servicio Geológico de los Estados Unidos. A partir de entonces, la volcanología, que al principio hablaba en latín (volcán), griego (cráter, piroclasto, fonolita, etc.) y español canario (malpaís, caldera), a partir del siglo 20 hablará en hawaiano (pahoehoe, aa) o inglés (hot spot, mantle plume, rift, etc.).

Aun así, en las últimas décadas la investigación volcanológica de las Canarias ha experimentado un avance espectacular, gracias en gran parte al impulso inicial de Fúster y sus colaboradores. Centenares de investigadores, predominantemente europeos, han aportado una pléthora de información geológica, hasta el punto de que el conocimiento existente de la geología de las Islas Canarias se aproxima ya al de las Islas Hawaii, siendo las Canarias para Europa un campo privilegiado para el estudio del volcanismo, similar a lo que las Hawaii suponen para los EE.UU.

No obstante, las Islas Canarias y las Hawaii tienen importantes diferencias geológicas. Como George Walker distinguió en 1990 en su revisión de la geología de las Islas

Hawaii<sup>8</sup> el magma de estas islas se produce a temperaturas más elevadas y con tasas de fusión parcial cercanas al 30% de la roca del manto, generando magmas toleíticos. En las Canarias, en cambio, el magma se produce a temperaturas más bajas y con tasas de fusión parcial mucho menores, dando lugar a magmas basálticos. Estas altas tasas de fusión parcial del manto en las Hawaii y la baja permanencia como islas emergidas inhibe la evolución del volcanismo hacia erupciones félsicas, que en las Canarias están muy bien representadas (por ejemplo el propio Teide), así como sus productos, formas y paisajes. Esta complementariedad fue decisiva para la inclusión en 2007 del Parque Nacional del Teide en la lista del Patrimonio Mundial<sup>9</sup>.

## ENTORNO GEODINÁMICO DEL ARCHIPIÉLAGO CANARIO

Parece obvio, pero debemos pensar que para que se formen islas oceánicas antes tiene que formarse un océano, y es precisamente la apertura del Atlántico el marco geodinámico que precede y condiciona el nacimiento del Archipiélago Canario, sus hermanos, hoy sumergidos, y sus primos, los restantes archipiélagos macaronésicos. Este marco geodinámico, muy activo y cambiante, tiene como preludeo la generación de una extensa zona volcánica en el lugar donde ahora están las Canarias, la Provincia Magmática del Atlántico Central (CAMP en sus siglas en inglés por *Central Atlantic Magmatic Province*), posiblemente a causa de los esfuerzos distensivos que propiciaron el comienzo, hace unos 180 millones de años, del desgaje y separación de las placas africana y americana y la apertura del Atlántico. No deja de ser digno de resaltar que un canario, Simón Benítez Padilla, ya analizara en 1945<sup>10</sup> las ideas de Wegener en relación a Canarias, una visión global y muy avanzada para la época. Ya por aquellos años Benítez Padilla indicó con claridad que analizando la información geológica disponible “no hay parentesco del territorio canario con el africano, a pesar de su proximidad”.

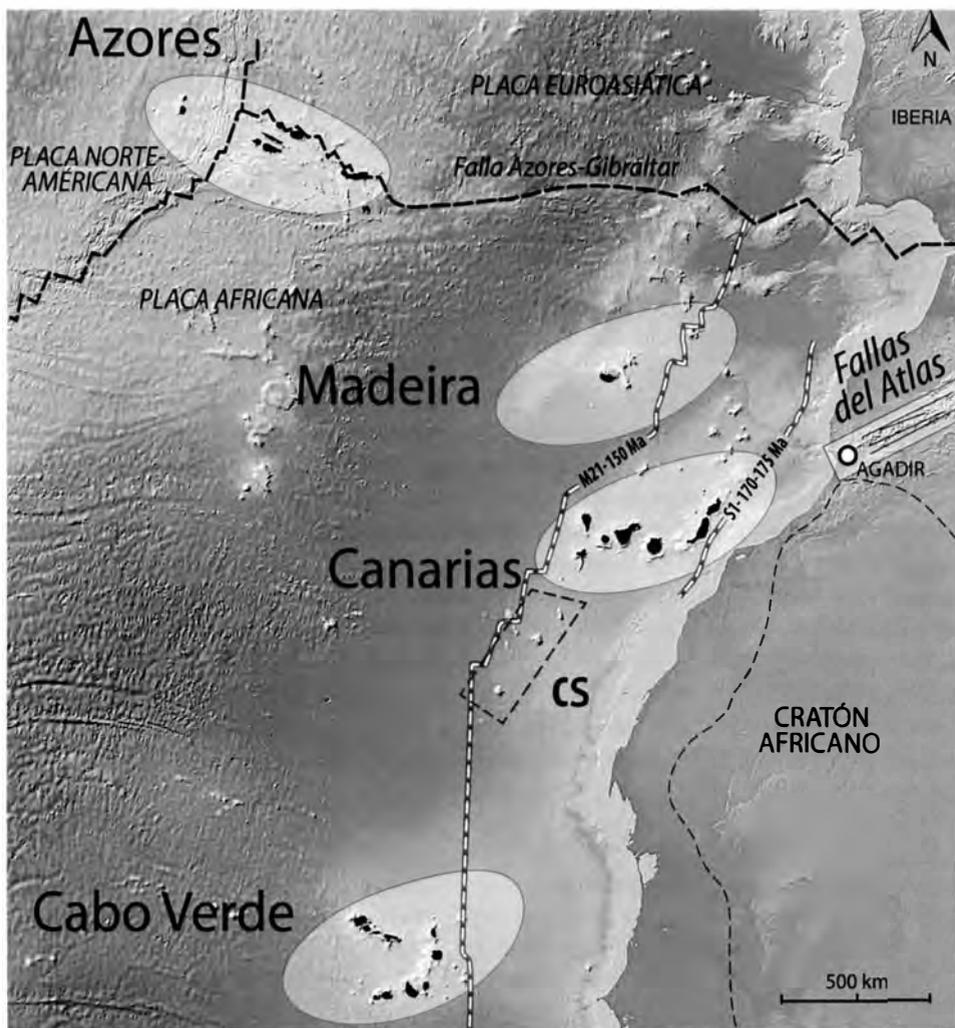
La zona que podemos considerar como el marco geodinámico de las Canarias y el resto de los archipiélagos macaronésicos está acotada por estructuras derivadas del proceso que originó el Océano Atlántico, y que aún continúa (Fig. 1). El límite al oeste es un borde constructivo, la Dorsal Centro-Atlántica, que aporta el empuje que desplaza las placas; al este, un borde continental pasivo, la costa africana que, como su nombre indica, carece de actividad geológica significativa; al norte, una gran falla transformante, que corre desde las Azores al estrecho de Gibraltar. Otro elemento tectónico importante dentro de este marco es el conjunto de fracturas y plegamientos al norte de África, causado por el choque de las placas africana y euro-asiática. Finalmente, un elemento adicional hasta ahora apenas considerado es el gran cratón africano (WAC, *West Africa Craton*), situado muy próximo frente a las Canarias, cuyo papel en la génesis y evolución de este Archipiélago algunos han considerado relevante.

---

<sup>8</sup> Walker, G.L., 1990. Geology and volcanology of the Hawaiian Islands. *Pacific Science* 44-4: 315-347.

<sup>9</sup> Carracedo, J.C., 2007. Outstanding geological values: the basis of Mt. Teide's World Heritage nomination. *Geology Today* 24-3: 104-111.

<sup>10</sup> Benítez Padilla, S., 1945. Ensayo de síntesis geológica del Archipiélago Canario. *El Museo Canario* 14: 9-38.



**Fig. 1.-** El Atlántico Central en el entorno de las Islas Canarias, que abarca las placas tectónicas Euroasiática, Norteamericana y Africana, está limitado por la Dorsal Centroatlántica y la Falla Azores-Gibraltar. En esta amplia zona se han formado cuatro archipiélagos volcánicos: Madeira, Cabo Verde, Canarias y Azores, conocidos como los Archipiélagos Macaronésicos. Los tres primeros comparten un origen por la acción de una pluma del manto o punto caliente, mientras que las Azores se han construido por la actividad de un punto caliente en la zona de fracturas de la Falla Azores-Gibraltar. Este distinto origen confiere a ambos tipos de islas marcadas diferencias, entre otras la diferente forma, sismicidad y progresión de edades, patentes en todos estos archipiélagos excepto en las Azores. La presencia del sistema de fallas del Atlas frente a las Canarias es un hecho circunstancial sin influencia en la formación de la Provincia Volcánica de Canarias, que comenzó mucho antes. Las fracturas del Atlas, afectando a la corteza continental, no se propagan en la corteza oceánica, por lo que no han podido afectar al archipiélago. Por otra parte, de haber coincidido, como en las Azores, una pluma del manto y estas fracturas del Atlas, las características geológicas →

De todos estos procesos ¿cuáles intervienen en la formación de las Canarias? Probablemente ninguno, ya que el origen de las Canarias es muy posiblemente subcortical, aunque el debate se centra, como luego veremos, en si es la dinámica compresiva que origina las fallas del Atlas la que propició la formación de las Canarias, o interviene de forma esencial un componente del manto terrestre que nada tiene en común con estos elementos geológicos y que aún no he introducido para mantener la tensión del relato.

Aquí surge una primera cuestión esencial ¿por qué los archipiélagos de Madeira y Cabo Verde presentan características geológicas similares a las de Canarias y no así las Azores, que son diferentes al estar directamente emplazadas en la Dorsal Centro-Atlántica? Si aceptamos que la formación de las Canarias está asociada al plegamiento del Atlas ¿qué proceso ha formado entonces los otros archipiélagos macaronésicos, totalmente desconectados de esa zona de plegamiento y fracturación del Atlas? Porque se podría pensar, con buen criterio, que la pretendida asociación de Canarias con esta zona de fracturas del norte de África sea una mera coincidencia, un aspecto circunstancial sin trascendencia geológica alguna, inducida por la situación de las Canarias en la prolongación de este sistema de fallas norteafricano. Esta percepción se acentúa si se analiza la historia geológica del plegamiento del Atlas, que inicialmente se pensó que habría tenido lugar en varios pulsos desde el Eoceno (hace unos 40 millones de años), hasta el Mioceno, hace unos 20 millones de años (como afirmaba, por ejemplo, el geólogo marroquí Robert Ambroggi en 1963)<sup>11</sup>.

Numerosos estudios posteriores han reconstruido una historia muy diferente, porque aunque la convergencia entre África y Eurasia comenzó en efecto en el Cretácico y continuó hasta la actualidad, los esfuerzos compresivos fueron absorbidos desde el Oligoceno, hace unos 23-33 millones de años, hasta principios del Mioceno (entre 30 y 20 millones de años) en la zona que va de Alborán hasta Calabria<sup>12</sup>, y sólo alcanzaron la zona del Atlas a finales del Mioceno (6 a 5 millones de años), y más aún, a principios del Cuaternario, hace algo más de 2 millones de años, por lo que no parece guardar relación alguna con el origen de las Canarias orientales, que son muy anteriores<sup>13</sup>.

---

<sup>11</sup> Ambroggi, R., 1963. Étude géologique du versant meridional du Haut Atlas occidental et de la plaine du Souss. Notes Mém. Serv. Geol. Maroc 157.

<sup>12</sup> Frizon de Lamotte, D., Saint Bezar, B., and Bracène, R., 2000. The two main steps of the Atlas building and geodynamics of the western Mediterranean: *Tectonics* 19: 740-761.

<sup>13</sup> Gutiérrez, M., Casillas, R., Fernández, C., Balogh, K., Ahijado, A., Castillo, C., Comenero, J.R., García-Navarro, E., 2006. The submarine volcanic succession of the basal complex of Fuerteventura, Canary Islands: A model of submarine growth and emergence of tectonic volcanic islands. *Geological Society of America Bulletin* 118: 785-804.

---

de las Canarias serían más parecidas a las de las Azores que al resto de los archipiélagos macaronésicos, cosa que es evidente que no sucede. Obsérvese que las Canarias se han formado sobre una corteza oceánica más antigua (entre las anomalías magnéticas S1 y M21), correspondiente a las primeras fases de apertura del Atlántico. La alineación de montes submarinos al SO de las Canarias han sido datados como cretácicos, aparentemente asociados a fracturas activas en las fases tempranas de apertura del Atlántico y sin relación con el volcanismo que originó la Provincia Volcánica Canaria.

Al final, todo se reduce a un dilema básico: Lo que quiera que sea que ha formado las Canarias o bien es un proceso dependiente de la litosfera y sus estructuras tectónicas, o, por el contrario, es algo completamente ajeno a la corteza, que se limita a perforar y usar de basamento.

## LA CORTEZA EN LA ZONA DE CANARIAS

Como ya hemos apuntado, iniciar el estudio del volcanismo de las Canarias por su extremo oriental, el más antiguo y, sobre todo, el más cercano al continente africano, ha dado lugar a numerosas ideas preconcebidas, algunas muy difíciles de eliminar. Entre éstas está la naturaleza continental u oceánica de la corteza sobre la que se asientan las Canarias.

Las primeras aportaciones suponen que las Islas, al menos las orientales, son parte del vecino continente o, al menos, se asientan sobre una parte de él. Esto ocurre incluso una vez conocida y aceptada la separación de África y América para formar el Océano Atlántico. Un entrante de unos 400 km de anchura entre Tarfaya y Agadir se corresponde con un vacío que queda cuando se invierte mediante ordenador la separación de las costas de América del Norte y África. En un artículo de Nature de 1970<sup>14</sup> dos geólogos americanos (Robert Dietz y Walter Sproll) explicaron esta aparente anomalía como un fragmento desgajado de África al iniciarse la apertura del Atlántico, un microcontinente siálico sobre el que se habrían asentado las islas de Fuerteventura, Lanzarote y el Banco de Concepción. Dos años antes se encontraron huevos de gran tamaño en niveles de arenas fósiles de Famara (Lanzarote), que fueron identificados inicialmente como huevos de ratis, una especie de avestruz no voladora. Pero ¿cómo llegaron a Lanzarote si no podían volar? Peter Rothe y Hans Schmincke dieron su interpretación en otro artículo de Nature de 1968<sup>15</sup>, sugiriendo la existencia de una conexión entre las Canarias orientales y el continente, una especie de puente continental (*landbridge* en el original).

Sin embargo, la asociación de las Canarias orientales con una masa continental fue pronto abandonada. Como sugiere Francisco García Talavera en un artículo publicado en 1990 en la revista de esta Academia, los huevos encontrados podrían ser de grandes aves voladoras del tipo de las Odontopterygiformes, parecidas a los pelicanos pero de gran tamaño, que utilizaban las arenas miocenas de Fuerteventura y Lanzarote para anidar<sup>16</sup>. Por otra parte, para que existiera un puente continental entre estas islas orientales y África las islas tendrían que haberse formado hace 180 millones de años, ya que existe en esa zona un depósito ininterrumpido de sedimentos de unos 10 km de espesor que comenzó a formarse en esa época<sup>17</sup>. La solución final vino de la geofísica, concretamente de perfi-

---

<sup>14</sup> Dietz, R.S. and Sproll, W.P., 1979. East Canary Islands as a microcontinent within the Africa-North America continental drift fit. Nature 226: 1043-1045.

<sup>15</sup> Rothe, P. and Schmincke, H.U., 1968. Contrasting origins of the eastern and western islands of the Canarian Archipelago. Nature 218: 1152-1154.

<sup>16</sup> García-Talavera, F., 1990. Aves gigantes en el Mioceno de Famara. Rev. Acad. Canar. Cienc. 2, 71-79.

<sup>17</sup> Roeser, H.A., Hinz, K., Plauman, S., 1971. Continental margin structure in the Canaries. In: Delany, F.M. (ed) The geology of the east Atlantic continental margin 2. Africa. Rep. 70/16 Inst. Geol. Sci., London: 27-36.

les sísmicos de refracción<sup>18</sup>, que demostraron sin ambigüedad que todas las Canarias se asientan sobre corteza oceánica, precisamente la creada en los inicios de la separación continental y, por lo tanto, la más antigua.

En 1963, Frederik Vine y su director de tesis, Drumon Matthews, ambos de la Universidad de Cambridge, publicaron en *Nature*<sup>19</sup> un artículo revolucionario, base fundamental de la Tectónica de Placas. Tanto, que a otro geofísico, Lawrence Morley, del Servicio Geológico de Canadá, le rechazaron pocos años antes en *Nature* y el *Journal of Geophysical Research* la misma idea de las anomalías magnéticas impresas en la corteza oceánica<sup>20</sup>, una especie de “pijama a rayas” que se aprecia al hacer perfiles magnéticos a lo ancho del Atlántico. En realidad se trata de un fenómeno global originado por la impresión en la corteza oceánica del campo magnético terrestre al tiempo que la lava se va creando y enfriando y continúa la expansión, forzando el alejamiento de las placas y el ensanchamiento del Atlántico.

El campo magnético cambia periódicamente su polaridad, siendo ésta unas veces similar al actual y otras inversa, lo que origina anomalías positivas cuando el campo magnético terrestre y el magnetismo impreso en las lavas coinciden, y anomalías negativas cuando ambos se oponen. La teoría de Vine-Matthews-Morley, que se llama así para subsanar el lamentable error por exceso de celo de un editor, es una confirmación fundamental de la expansión de los fondos oceánicos y la deriva continental, crucial asimismo para la tectónica de placas. Las anomalías magnéticas presentan, lógicamente, una edad creciente al distanciarse de la dorsal Centro-Atlántica, que es donde la corteza oceánica se crea. Las Islas Canarias quedan enmarcadas por las anomalías S1, de 170-175 millones de años, y la M21, con 150 millones de años. Evidentemente, la extrema antigüedad de estas anomalías excluye cualquier relación entre la corteza oceánica y la formación de las Canarias (y todos los archipiélagos macaronésicos), que son procesos independientes y muy separados en el tiempo.

Una última observación en este apartado, sobre la que luego volveremos, es la idea extendida de que fracturas formadas en el continente puedan continuar en la corteza oceánica. Tuve ocasión de aclarar este concepto en 1996 en un lugar espectacular, en la cubierta del buque oceanográfico Ka'imikai-O-Kanaloa (el Buscador Celestial de los Mares) de la Universidad de Hawaii, fondeado frente a la costa norte de la isla de Molokai, el acantilado vertical más alto del planeta originado por uno de los mayores deslizamientos gigantes conocidos que estábamos investigando. Estaba con el mejor especialista en el tema de la propagación de fracturas en diferentes medios, el profesor Uri ten Brink, al que había dado un manuscrito (para que lo comentara), que contenía una crítica sobre la viabilidad de que la falla del Atlas se propagara hasta las Canarias. Su opinión fue rotunda: el paso de una fractura de la corteza continental a la oceánica es como intentar pasar con una cuña una raja de la madera al acero. Me dio un trabajo suyo publicado

---

<sup>18</sup> Banda, E., Danobeitia, J.J., Suriñach, E., Ansorge, J., 1981. Features of crustal structure under the Canary Islands. *Earth Planet. Sci. Lett.* 55, 11-24.

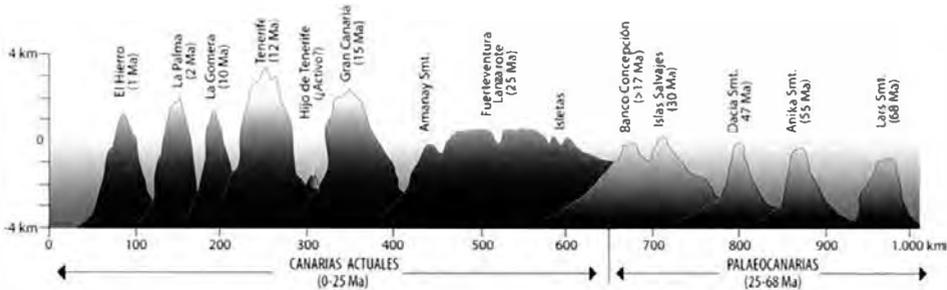
<sup>19</sup> Vine, F. J. and Matthews, D. H., 1963. Magnetic anomalies over oceanic ridges. *Nature* 199: 947-949.

<sup>20</sup> En realidad todos trataron de arreglar este error, por lo que esta teoría se conoce como la hipótesis Vine-Matthews-Morley, a veces como Morley-Vine-Matthews.

en 1991 en *Geology*<sup>21</sup> que lo demostraba científicamente y que incluí en las referencias del artículo que me publicaron en 1998 en el *Geological Magazine* de la Universidad de Cambridge<sup>22</sup>. Desde entonces tengo claro que la fractura propagante del Atlas a Canarias es conceptualmente inviable.

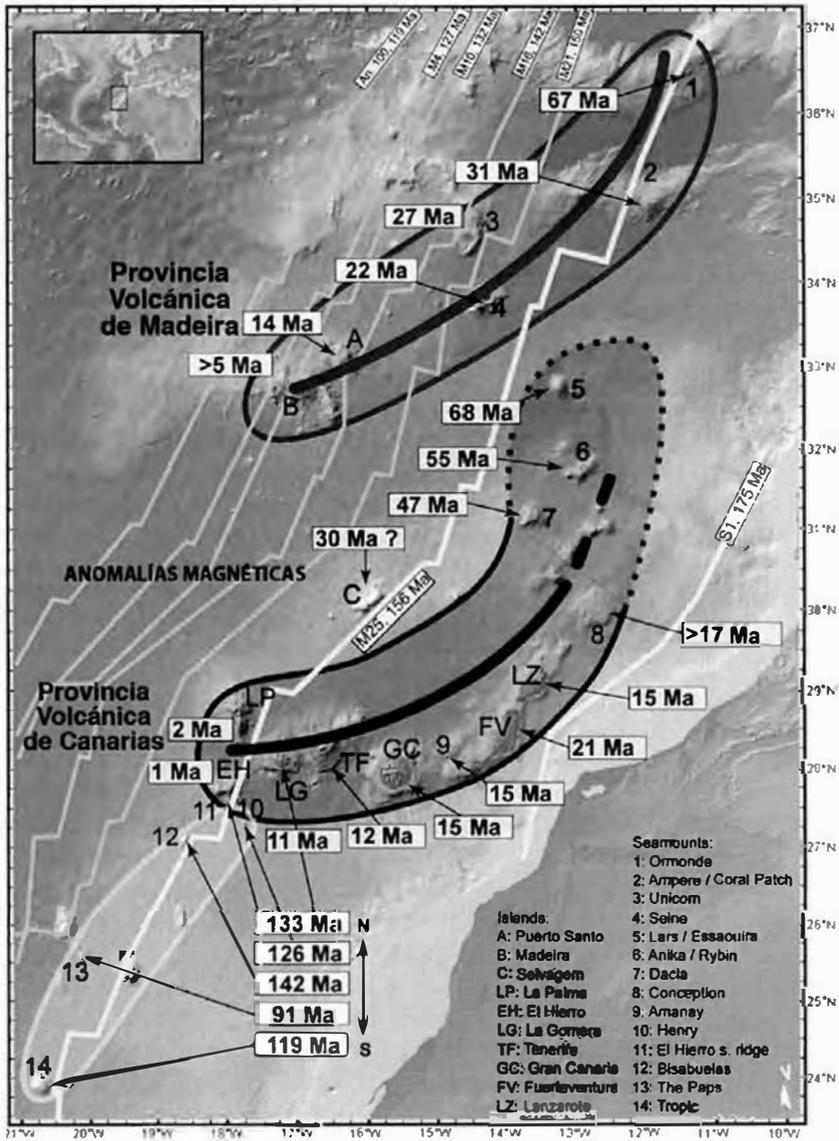
## LA PROVINCIA VOLCÁNICA CANARIA

En este intento de sintetizar los aspectos geológicos fundamentales que nos van a ayudar a exponer un modelo científicamente coherente sobre el origen de las Canarias nos queda introducir una información relevante publicada hace sólo unos años, concretamente en 2001, por un grupo alemán del *Geomar Research Center*; en Kiel. En esta campaña se trataba de analizar un conjunto de montes submarinos que forman una prolongación de la alineación de las Canarias hacia el norte<sup>23</sup>. Dragaron muestras de estos montes submarinos que dataron y analizaron, e hicieron lo mismo con Madeira y su correspondiente prolongación de montes submarinos. Los resultados cambiaron el concepto que teníamos de estos archipiélagos, que considerábamos formados sólo por las islas, olvidando que había otras islas anteriores, que en otro tiempo, hace millones de años, fueron iguales que



**Fig. 2.-** La alineación de islas que forman actualmente el Archipiélago Canario se prolonga hacia el NE con una hilera de montes submarinos, los restos de anteriores islas de la misma cadena que se han sumergido por el efecto de la erosión y la subsidencia. Estos montes submarinos fueron en una época “islas Canarias” o Paleocanarias, formando junto a las actualmente emergidas la Provincia Volcánica de Canarias. Una característica destacable es que el conjunto de la Provincia Volcánica presenta una clara progresión de edades desde El Hierro, en el extremo occidental de la cadena, hasta el Monte Submarino Lars, datado en 68 millones de años (Geldmacher et al., 2005).

<sup>21</sup> ten Brink, U. S. 1991. Volcano spacing and plate rigidity. *Geology* 19: 397-400.  
<sup>22</sup> Carracedo, J.C., Day, S., Guillou, H., Rodríguez Badiola, E., Canas, J.A. and Pérez Torrado, F.J. 1998. Hotspot volcanism close to a passive continental margin: the Canary Islands. *Geological Magazine*, 135 (5): 591-604.  
<sup>23</sup> Geldmacher, J., Hoernle, K., Van den Bogaard, P., Duggen, S., Werner, R., 2005. New <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar age and geochemical data from seamounts in the Canary and Madeira volcanic provinces: support for the mantle plume hypothesis. *Earth and Planetary Science Letters* 237: 85-101.



**Fig. 3.-** Las alineaciones de islas y montes submarinos (antiguas islas erosionadas y sumergidas) de las Provincias Volcánicas de Madeira y Canarias presentan trazas isócronas y curvadas, con un polo de rotación común (Polo Euler para el periodo 0-70 millones de años). Si a esto sumamos la progresión de edades de ambas alineaciones parece evidente que la explicación más plausible es una pluma del manto fija actuando en una placa en movimiento (modificado de Geldmacher et al., 2005). En cambio, los montes submarinos al sur de las Canarias son mucho más antiguos (Cretácicos), no presentan progresión de edades y están alineados con las anomalías magnéticas correspondientes a las fases iniciales de apertura del Atlántico, por lo que no parecen tener relación alguna con la Provincia Volcánica Canaria, muy posterior.

las actuales y ahora son montes submarinos. Por eso, más que hablar de las Canarias, desde el punto de vista de la geología debemos hablar de la Provincia Volcánica de Canarias, que incluye esos montes submarinos (Fig. 2). Aportaron asimismo unos datos cruciales en apoyo de una pluma o penacho magmático como el verdadero promotor de estos archipiélagos, al comprobar que tanto islas como montes submarinos presentan una consistente progresión de edades, y esto tanto en la Provincia Volcánica de Canarias como en la de Madeira.

Aportaron también un dato relevante: ambas provincias volcánicas formaban alineaciones en arco, no sólo paralelas sino coetáneas. Ambas tenían un polo Euler de rotación coincidente y los análisis geoquímicos indicaban que todas las islas y montes submarinos de la Provincia Volcánica de Canarias procedían de una fuente magmática común, lo mismo que sucedía en la Provincia Volcánica de Madeira, pero las fuentes magmáticas eran diferentes en ambas provincias volcánicas. Es decir, dos alineaciones paralelas y coetáneas, un polo de rotación común y dos focos magmáticos diferentes. La conclusión es evidente e implica dos penachos magmáticos fijos actuando en una placa litosférica que se desplaza con una traza curvada (Fig. 3). Pero como de nuevo me estoy anticipando, voy a dar paso ya al debate sobre el origen de las Canarias, claramente delineado por las anteriores consideraciones que ahora emplearé directamente para apoyar decididamente uno de los lados del debate que, como ya habrán adivinado, se centra en el dilema fractura propagante vs. penacho magmático, más conocido como punto caliente, *hot-spot* en la versión original.

## MODELOS DE GÉNESIS

Ya hemos presentado, siquiera sea de forma muy resumida, las condiciones que el escenario geológico impone a un modelo conceptual sobre el origen de las Canarias. Podemos analizar ahora el origen de estos archipiélagos Macaronésicos, especialmente el de las Canarias. Pero ¿porqué es tan importante el origen de estas islas? ¿Qué consecuencias puede tener que sea uno u otro el proceso que las ha originado? Por resumir, es relevante conocer la causa última que ha originado las islas porque el proceso que las inició ha seguido actuando, condicionando su posterior evolución y las características geológicas fundamentales: los magmas implicados, la forma y estructura de los edificios insulares, la naturaleza y distribución de terremotos y volcanes, etc. De hecho, la realidad geológica de las Canarias sólo puede explicarse asociando su origen a un proceso determinado, que podemos analizar ahora.

Hemos reducido las posibilidades a dos modelos genéticos bien definidos: uno dependiente de la corteza, el otro totalmente independiente de ella, el primero una fractura asociada al Atlas, el segundo un penacho de magma del manto más caliente que el resto. Pasemos ahora a repasar los apoyos y críticas a ambos modelos, que han mantenido durante 40 años esta viva controversia, a veces enconada. Pero antes de adentrarnos en este dilema, que es el meollo de este discurso, permítanme reconocer cierta predisposición hacia el modelo de punto caliente, porque yo me encontraba en esos años en que el paradigma de la tectónica de placas se estaba consolidando haciendo una estancia de postgrado en la Universidad de Toronto. Y da la casualidad que, como ya apunté anteriormen-



Fig. 4.- Esquema simplificado del origen de las Canarias por la acción de un punto caliente, el modelo que mejor explica la formación de este archipiélago. Un penacho de magma anómalamente caliente arranca posiblemente de la base del manto terrestre, a cerca de 3000 km de profundidad, asciende por su menor peso y sale a la superficie sobre la placa africana, en lento desplazamiento hacia el NE. Este aporte masivo de magma construye el grueso (90%) de cada una de las islas en un tiempo relativamente corto (1-3 millones de años), tras lo cual la isla se desconecta de la fuente de alimentación y comienza a formarse la siguiente. Este proceso reiterativo construye una alineación de islas de edad progresivamente mayor cuanto más se aleja del punto caliente, lo que supone la repetición de un mismo patrón de isla, siendo las evidentes diferencias entre las diferentes islas el resultado del progresivo desmantelamiento erosivo. En las Canarias, la isla de Tenerife marca el punto culminante de crecimiento, mientras que las islas occidentales aún no han culminado su desarrollo potencial, y las orientales, donde la erosión es predominante, están en avanzado estado de desmantelamiento.

te, uno de los profesores de esa universidad era Tuzo Wilson, el geólogo que enunció esa teoría para explicar la formación de las Islas Hawaii. No es pues extraño que, desde el principio, tomara partido por este modelo y que lo aplicara en la realización de mi tesis doctoral sobre la historia volcánica de la isla de Tenerife<sup>24</sup> (Fig. 4).

El desencadenante de la controversia punto caliente vs. fractura propagante fue la publicación en 1971-1972 de las primeras edades radiométricas (K/Ar) de las Canarias<sup>25</sup>, que indicaban una clara progresión de edades desde El Hierro a Fuerteventura. Unos años

<sup>24</sup> A mi regreso en 1971 tuve la experiencia un tanto extraña de dar una conferencia sobre tectónica de placas y puntos calientes a mis profesores de la Facultad de Geología de la Complutense de sólo unos pocos años antes, con el profesor Fúster entre los oyentes. Al iniciar mi tesis doctoral en Tenerife, fui profesor interino de Ciencias Naturales en un Instituto de Enseñanza Media (Poeta Viana) de Santa Cruz de Tenerife, posiblemente el primero y único en el que, en aquella época, se enseñaba tectónica de placas.

<sup>25</sup> Abdel-Monem, A., Watkins, N.D., Gast, P.W., 1971. Potassium-Argon ages, volcanic stratigraphy, and geomagnetic polarity history of the Canary Islands: Lanzarote, Gran Canaria, and La Gomera. *American Journal of Science*, 271: 490-521.

Abdel-Monem, A., Watkins, N.D., Gast, P.W., 1972. Potassium-Argon ages, volcanic stratigraphy, and geomagnetic polarity history of the Canary Islands: Tenerife, La Palma, and El Hierro. *American Journal of Science*, 272: 805-825.

después, Francisco Anguita y Francisco Hernán, profesores de las universidades Complutense y La Laguna, respectivamente, publicaron en *Earth and Planetary Science Letters*<sup>26</sup> un artículo que causó gran impacto al asociar el origen de las Canarias a una fractura que, al propagarse desde el sistema de fallas del Atlas, facilitaría la generación de magma por un proceso de descompresión adiabática y su salida a la superficie para formar el Archipiélago. Pero esta hipótesis tenía evidentes contradicciones. Para empezar, suponiendo que explicara el origen de las Canarias ¿qué pasaba con los demás archipiélagos macaronésicos, también formados por islas volcánicas oceánicas que no estaban en la prolongación del Atlas?

Pero los verdaderos problemas científicos de esta hipótesis surgían de hechos indiscutibles. Aparte de la obvia dificultad ya citada de la propagación de una fractura continental a la corteza oceánica, la más vieja, “fría” y rígida del planeta, había un inconveniente insalvable para que una fractura pudiera fundir por simple descompresión de la astenosfera tal cantidad de magma. Esta intuición sería confirmada de forma incuestionable en 1989 por dos geólogos de la Universidad de Cambridge, Robert White y Dan McKenzie, en un trabajo publicado en el *Journal of Geophysical Research*<sup>27</sup>. En este artículo se demuestra que para que tal volumen de magma esté disponible para salir a la superficie hace falta que la astenosfera en esa zona sea anómala, con una temperatura de varios cientos de grados por encima de los valores normales.

Aparece aquí el verdadero factor crucial en el origen de las Canarias y de todos los archipiélagos macaronésicos: una anomalía térmica, también conocida como pluma o penacho del manto, con temperaturas en exceso de, al menos, 100-200°C. Vincent Courtillot y colaboradores<sup>28</sup> han modelizado y clasificado las plumas mantélicas del planeta, separando dos tipos: las primarias o superplumas, como la de Hawaii, que arrancan de la base del manto, y las secundarias, como la de Canarias, que parten de la cabeza de plumas primarias. Estos penachos, con temperaturas en exceso de 100-200°C, han sido incluso “fotografiados” por Raffaella Montelli y colaboradores en 2006<sup>29</sup>. Aprovechando la diferente velocidad de propagación de las ondas sísmicas en función de la temperatura del manto y la litosfera (más lenta a temperaturas más altas), obtuvieron imágenes a partir de observaciones realizadas en los grandes terremotos que afectan globalmente al planeta. En estas imágenes de tomografía sísmica aparecen claramente las plumas del manto que han formado los archipiélagos de Canarias, Madeira y Cabo Verde. El problema es que estas plumas no pueden observarse directamente porque el interior de la Tierra es opaco, lo que siempre da lugar a controversias. La definición de las plumas mantélicas depende de observaciones indirectas, concretamente sísmicas a partir de los grandes terremotos, que se propagan a menor velocidad cuanto más caliente sea el medio que atravie-

---

<sup>26</sup> Anguita, F., Hernán, F., 1975. A propagating fracture model versus a hotspot origin for the Canary Islands. *Earth and Planetary Science Letters*, 27: 11-19.

<sup>27</sup> White, R. and McKenzie, D., 1989. Magmatism at rift zones: the generation of volcanic continental margins and flood basalts. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94, B6: 7685-7729.

<sup>28</sup> Courtillot, V., Davaille, A., Besse, J. and J. Stock, J., 2003. Three distinct types of hotspots in the Earth's mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 205: 95-308.

<sup>29</sup> Montelli, R., Nolet, G., Dahlen, F.A. and Masters, G., 2006. A catalogue of deep mantle plumes: New results from finite-frequency tomography. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7, Q11007.

sen. Las plumas no se “ven” con suficiente claridad, porque la red sísmica global no tiene suficiente densidad y las imágenes aportadas carecen de suficiente resolución, dejando indefinida la profundidad de partida de estas estructuras. No obstante, aunque hay muchos detractores, aún no existe un modelo alternativo, y la gran mayoría de los geólogos y geofísicos aceptan este modelo de pluma del manto como la mejor explicación del volcanismo de islas oceánicas.

El magma de estas plumas asciende pasivamente desde la base del manto, ya que al ser más calientes son boyantes. Al llegar a la base de la corteza la empujan y deforman, y eventualmente la fracturan para salir a la superficie. Si esto es así ¿para qué necesitamos la fractura? Aunque la hubiera, sería irrelevante sin la presencia de una anomalía térmica (por supuesto, no todas las fallas originan magmatismo, de lo contrario el planeta estaría lleno de volcanes), y, en cambio, si existe la anomalía térmica no hace falta para nada la presencia de una fractura, que el mismo penacho magmático puede generar.

Ante estos irrefutables inconvenientes, expuestos por el que les habla en 1989 en el artículo ya citado publicado en el *Geological Magazine* de la Universidad de Cambridge<sup>30</sup>, Anguita y Hernán modificaron su modelo inicial aceptando la existencia de una anomalía térmica en la zona de Canarias<sup>31</sup> e integrándola con la fractura en un nuevo “modelo unificado”, publicado en 2000 en el *Journal of Volcanology and Geothermal Research*<sup>32</sup>.

Sin embargo, tampoco será esta nueva hipótesis viable y la prueba concluyente viene precisamente de las Azores, uno de los archipiélagos macaronésicos, donde coinciden una gran fractura activa y una fuerte anomalía térmica. Y ¿qué ocurre en este archipiélagos? Como ya hemos indicado, la edad del volcanismo en las Azores no presenta pauta alguna, con islas unas veces coetáneas y otras entremezclándose las islas jóvenes entre otras más antiguas. Esta ausencia de progresión de edades en escenarios geológicos donde coinciden fracturas y anomalías térmicas fue comprobada en las numerosas cadenas de islas y montes submarinos de la Provincia Volcánica del Pacífico Sur<sup>33</sup> y parece ser una característica común de este tipo de alineaciones volcánicas asociadas a fracturas.

La ordenación de las edades en progresión constante a partir del extremo más joven de la alineación de islas es, sin duda, el elemento más característico y diagnóstico de los archipiélagos de punto caliente. Si recordamos que tanto la Provincia Volcánica de Canarias como la de Madeira presentan trazas curvadas, coetáneas y con un mismo polo de rotación es intuitivo aceptar que tal escenario geológico requiere una placa que se des-

---

<sup>30</sup> Carracedo, J.C., Day, S., Guillou, H., Rodriguez, E., Canas, J.A., Pérez-Torrado, F.J., 1998. Hotspot volcanism close to a passive continental margin. *Geological Magazine* 135: 591-604.

<sup>31</sup> Estos autores indican en su artículo de 2000 que “The hotspot is vindicated, since the origin of the magmas is a mantle thermal anomaly...”, aceptación que realmente debería haber finalizado la controversia. Sin embargo, añaden que “The propagating fracture is necessary to tap the magmas from the thermal anomaly...”, afirmación incorrecta ya que, como se ha indicado, la fracturación cortical puede originarla el empuje ascendente del magma, y las islas formadas en asociación con una fractura no muestran progresión de edades, e.g. Las Azores.

<sup>32</sup> Anguita, F. and Hernán, F., 2000. The Canary Islands origin: a unifying model. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 103, 1-26.

<sup>33</sup> Koppers, A. A. P., Staudigel, H., Pringle, M. S. and Wijbrans, J. R., 2003. Short-lived and discontinuous intraplate volcanism in the South Pacific: Hotspots or extensional volcanism? *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 4(10), 1089, doi:10.1029/2003GC000533, 2003.

plaza girando y un punto fijo de generación de magma que atraviesa la corteza y sale a la superficie formando islas (ver Fig. 3).

Pero si la fractura propagante queda eliminada por inviable, incluso en presencia de una anomalía térmica ¿por qué se mantiene el debate? Una explicación es que para demostrar la progresión de edades hay que datar las formaciones volcánicas emergidas más antiguas de cada isla, lo que no siempre es fácil ni factible. No sólo es difícil determinar con precisión cuáles son las lavas emergidas más antiguas, sino que hay que contar con el inconveniente añadido de que a mayor antigüedad suele corresponder un mayor grado de alteración, lo que con frecuencia conduce a edades erróneas. Basta analizar la literatura geológica para ver frecuentes discrepancias entre diversos autores a la hora de definir la edad del volcanismo emergido más antiguo de cada isla, lo que mantiene viva la controversia.

El debate se ha avivado por una publicación muy reciente. Paul van den Bogaard, del *Geomar Research Center* alemán, publicó en 2013 un artículo en *Scientific Reports* del grupo Nature<sup>34</sup> a primera vista desconcertante. Este autor ha datado los montes submarinos al SO de las Canarias, obteniendo edades entre 142 y 93 millones de años, aparentemente irreconciliables con la pluma mantélica fija o punto caliente que he aducido como origen de las Canarias (CS en la Fig. 1). Este autor combina estos viejos montes submarinos con las islas y montes submarinos de la Provincia Volcánica de Canarias, trastocando completamente la "*conditio sine qua non*" para la existencia de esta pluma mantélica fija, ya que las edades <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar demostrarían que estos montes submarinos no son sistemáticamente más antiguos desde el extremo SO (Tropic, 119 Ma) al extremo NE (Essaouira, 68 Ma). Más aún, la mezcla de islas y montes submarinos muestra, en relación con las edades, una pauta aleatoria a lo largo de toda la alineación volcánica, con los más antiguos al SO, viejos y jóvenes en el centro de la alineación, y de edades intermedias al NE. Si nos atenemos a esta pauta, incluso aunque la placa Africana se moviera hacia adelante y hacia atrás, algo imposible, la distribución espacial y temporal de estos antiguos montes submarinos continuaría siendo incompatible con un modelo de punto caliente. Pero asimismo sería incompatible con el modelo de fractura asociada al Atlas, una estructura geológica cuya formación ocurriría decenas de millones de años más tarde.

Existe sin embargo una explicación más sencilla y coherente, que consiste en separar este grupo de montes submarinos cretácicos de la Provincia Volcánica Canaria. En apoyo de esta suposición está el hecho de que las edades no guarden pauta alguna, una característica típica del volcanismo controlado por fracturas. Además, la ordenación espacial de estos volcanes submarinos muestra un marcado alineamiento con las anomalías magnéticas impresas en el fondo oceánico, paralelas al eje de la dorsal, mientras que ya hemos visto que la Provincia Volcánica Canaria tiene una clara progresión de edades y un trazado curvo y paralelo a la Provincia Volcánica de Madeira, siguiendo el desplazamiento rotacional de la placa Africana en los últimos 60 millones de años. Puede pues concluirse que los montes submarinos cretácicos situados al SO de las Canarias corresponden a un episodio eruptivo asociado a fracturas activas durante las fases tempranas de apertura

---

<sup>34</sup> Van den Bogaard, P. 2013. The origin of the Canary Island Seamount Province - New ages of old seamounts. *Scientific Reports* 3: 1-7.

del Atlántico, sin relación alguna con la génesis de las Canarias<sup>35</sup>. La asociación de estos montes submarinos cretácicos con la Provincia Volcánica Canaria se debe a un hecho circunstancial, su cercanía a las Canarias, algo similar a lo que he expresado anteriormente respecto a la relación establecida del sistema de fallas del Atlas con el Archipiélago.

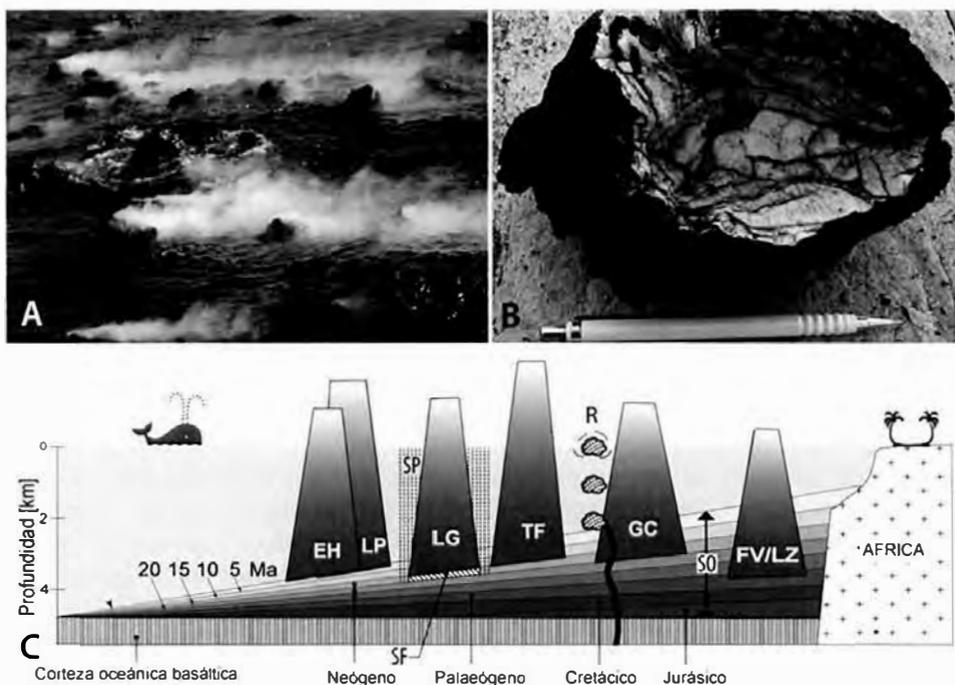
En cualquier caso parecería que se había llegado de nuevo a un punto muerto, porque Bogaard aducía, con razón, que sus edades eran tan creíbles como las demás. La solución definitiva sería poder datar el inicio del volcanismo de cada isla, es decir, las primeras lavas depositadas en el fondo oceánico, y comprobar de una vez por todas si la progresión de edades existe o no. Esta tarea requeriría perforar hasta la base de las islas, algo imposible, al menos por el momento. Además, todo sería más fácil y concluyente si se pudiera hallar un método de datación que no dependiera de las condiciones de alteración de las muestras datadas, por ejemplo la datación paleontológica. Pues bien, esa posibilidad, aparentemente inalcanzable, la proporcionó la propia naturaleza de la forma más inesperada en la reciente erupción submarina de 2011 en La Restinga, al sur de El Hierro. En esta última erupción de Canarias ocurrió un hecho nunca visto anteriormente en Canarias (aunque sí en otras erupciones submarinas, como la de La Serreta, ocurrida en 1998 en las Azores<sup>36</sup>), la aparición de bombas volcánicas con un núcleo interno formado por una sustancia arenosa de color claro (Fig. 5A,B). Nadie podía pensar que en estas bombas, rápidamente bautizadas como restingolitas, estaba la clave para demostrar de forma inequívoca la progresión de edades de las Islas, aportando la “pistola humeante” para acabar finalmente con el interminable debate sobre el origen de las Canarias. Y, lo más asombroso, la propia Naturaleza realizó el de otra forma imposible muestreo.

La interpretación precipitada de unos análisis efectuados en la materia blanca de las restingolitas hizo creer al principio de la erupción que se trataba de un material sálico, traquita o riolita, interpretación que, dicho sea de paso, alarmó aún más a la población por la inherente mayor explosividad potencial de este tipo de magmas félsicos. En realidad se trataba de arenas del fondo oceánico englobadas por el magma basáltico durante su ascenso. Los sedimentos oceánicos en esta zona del Atlántico forman secuencias que aumentan de espesor al acercarse al continente, desde alrededor de 1 km de grosor bajo El Hierro, hasta 8-10 km bajo las islas orientales (Fig. 5C). Estos sedimentos provienen fundamentalmente de África, del talud continental y una pequeña fracción de los aportes eólicos, también de África. Ambos componentes tienen cristales de cuarzo, un mineral que no existe libre en las rocas volcánicas de Canarias. Por otra parte, estos sedimentos oceánicos son ricos en fauna, principalmente nanofósiles calcáreos, una parte esencial del fitoplancton oceánico, con edades desde el Jurásico Inferior, hace unos 180 millones de años, hasta la actualidad. Los nanofósiles evolucionan rápidamente, con frecuentes extinciones y aparición de especies nuevas, por lo que son excelentes marcadores bio-estratigráficos.

---

<sup>35</sup> Zaczek, K., Troll, V.R., Cachao, M., Ferreira, F., Deegan, F.M., Carracedo, J.C., Meade, F.C., Burchardt, S. 2015. Nannofossils in 2011 El Hierro eruptive products reinstate plume model for Canary Islands. *Scientific Reports*, 5, 7945; p. 5.

<sup>36</sup> Kueppers, U., Nichols, A.R.L., Zanon, V., Potuzak, M., Pacheco, J.M.R., 2012. Lava balloons-peculiar products of basaltic submarine eruptions. *Bull. Volcanol.* 74-6: 1379-1393.



**Fig. 5.-** Esquema que ilustra cómo la erupción submarina de El Hierro en 2011 ha ayudado a resolver uno de los obstáculos que aún existían en la aceptación general de un punto caliente en la formación de las Canarias. Descartadas por inviables los modelos que asociaban la génesis de las Canarias a fracturas relacionadas con el sistema de fallas del Atlas, el único modelo alternativo que parecía adecuado, el punto caliente, requería de la existencia de una clara e indiscutible progresión de edades en el inicio del volcanismo de las sucesivas islas. Sin embargo, la datación de las fases iniciales estaba aparentemente fuera de alcance, limitándose la definición de la progresión de edades a la datación de las formaciones volcánicas emergidas que se suponían más antiguas. La inherente dificultad en definir estas formaciones, la falta de correspondencia entre islas y la escasa idoneidad de rocas tan antiguas y alteradas para su datación radiométrica restaba consistencia y fiabilidad a los datos obtenidos, hecho que no se logró subsanar, sino al contrario, aumentando el número de determinaciones. A título de ejemplo, mientras que las dataciones de La Gomera situaban para la mayoría de los autores la formación de esta isla después de Tenerife, Ancochea y col. (2006) se basaron en nuevas dataciones para colocarla en paralelo con la formación de Fuerteventura, mucho antes de la aparición de Tenerife, lo que, de ser cierto, excluiría claramente la necesaria progresión de edades en el archipiélago. Esta aparente contradicción se resolvió de la forma más inesperada por la aparición en la erupción submarina de El Hierro de bombas volcánicas con un núcleo interno formado por una sustancia arenosa de color claro que incluía cristales de cuarzo libre, inexistente en las lavas de Canarias. También contenía abundantes nanofósiles calcáreos, parte esencial del fitoplancton oceánico. Aunque la interpretación del comité científico oficial del PEVOLCA, el órgano oficial responsable del seguimiento de la erupción, interpretó el relleno de estas bombas volcánicas como material sálico, traquita o riolita, la presencia de cuarzo libre y fósiles hacía inverosímil tal explicación. Rocas similares se encontraron en todas las islas, comprobándose que los fósiles presentaban una clara progresión de edades a lo largo del archipiélago, esta vez de las fases iniciales →

El análisis del relleno de las restingolitas mostró que estas rocas tienen tanto cuarzo como restos de nanofósiles, demostrando inequívocamente que está formado por sedimentos oceánicos<sup>37</sup>. Aún más, cuando se inspeccionaron las demás islas se encontraron fragmentos de estos materiales sedimentarios en todas ellas, generalmente englobados en lapilli y escorias de conos volcánicos. Es decir, ¡había restingolitas en todas las Canarias!

Imaginemos ahora que en un ambiente en el que se están depositando sedimentos con nanofósiles de forma continua pudiéramos poner, en un punto y momento dados, una gran tapadera. Debajo de ésta se interrumpiría la sedimentación y, por lo tanto, los nanofósiles que habría debajo de la tapadera serían sólo los anteriores a la interrupción del depósito (ver Fig. 5C). Una enorme tapadera fue el inicio del volcanismo submarino en Fuerteventura hace unos 25 millones de años, lo que explica que los fósiles de las restingolitas de esta isla sólo tengan nanofósiles con edades desde el Cretácico hasta hace unos 25 millones de años. En El Hierro, la edad de los nanofósiles va desde el Cretácico hasta hace sólo unos 2 millones de años. Las demás islas presentan edades intermedias escalonadas, demostrando por otra vía más fiable la progresión de edades en el Archipiélago Canario y apoyando de forma incuestionable su origen por la acción de un punto caliente. Dos años después del artículo de van den Bogaard publicamos estos resultados en la misma revista, *Scientific Reports* del grupo Nature<sup>35</sup>.

Todo apunta a que el modelo que se basa en una anomalía térmica y un punto caliente es el que mejor explica las características geológicas de las Canarias (ver Fig. 4). Sin duda quedan puntos oscuros aún por esclarecer, pero ya sabemos que ninguna hipótesis está totalmente libre de contradicciones, como indica Kuhn en su ya mencionada *Structure of Scientific Revolutions* cuando dice que “Para ser aceptada como cierta, una teoría debe parecer mejor que sus competidoras; pero no necesita explicar, y en efecto nunca lo hace, todos los hechos que se puedan confrontar con ella”. En este sentido conviene resaltar que desde la formulación de ambas teorías en 1975, los nuevos datos obtenidos han reforzado sistemáticamente el modelo de punto caliente y han rebatido la asociación de las Canarias con una fractura propagante.

En conclusión, en la geología de las Canarias, a mi parecer, el espectacular aumento de la información ha conducido a un incremento correlativo de la simplicidad. Todo parece reducirse a una fuente magmática fija capaz de aportar magma a la superficie sobre una placa en lento movimiento. En este escenario geológico se repite un mismo patrón de isla, cuyas obvias diferencias se deben a su distinta edad y grado de evolución.

---

<sup>37</sup> Parece bastante intuitivo e incuestionable la imposibilidad de la presencia de fósiles en una roca formada a partir de magma que tiene una temperatura de 850-900°C.

---

del volcanismo de cada isla. Como se indica en el esquema, el inicio del volcanismo en una isla interrumpe inmediatamente la sedimentación marina (SP en la figura), por lo que los fósiles existentes bajo el edificio insular (SF) serán sólo aquellos que pudieron depositarse antes de iniciarse el volcanismo, que serán englobados por el magma (R) al atravesar la capa de sedimentos oceánicos (SO) y saldrán a la superficie en las erupciones volcánicas, dando una edad paleontológica al inicio de la formación de las sucesivas islas (Troll et al., 2012; Carracedo et al., 2015; Zaczek et al., 2015).

## LOS EDIFICIOS INSULARES

### *Los Complejos Basales*

Veamos ahora los avances que se han experimentado en las Islas Canarias en las últimas décadas en el estudio y definición de las etapas de desarrollo de sus edificios insulares y en la delimitación y correlación de las principales unidades volcano-estratigráficas.

Al abordar este tema nos topamos de nuevo con complicaciones surgidas por el ya mencionado comienzo del estudio geológico de las Canarias por las islas orientales, principalmente la isla de Fuerteventura, a sólo 95 km de la costa africana. Por otra parte, la complejidad de las formaciones que afloran en Fuerteventura explica la dificultad en la definición inicial de las secuencias estratigráficas, principalmente debido a la introducción del concepto de Complejo Basal, y la interpretación de los procesos que formaron la isla, muy influidos por la tectónica del vecino continente.

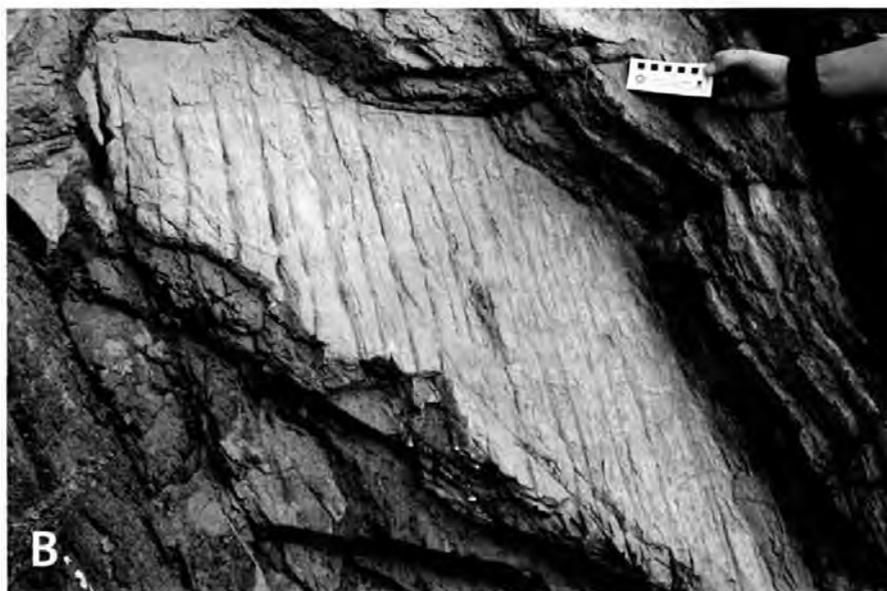
En un rápido repaso nos encontramos en Fuerteventura con una espectacular secuencia de sedimentos oceánicos mesozoicos de unos 1600 m de espesor con fauna del Cretácico (Fig. 6). Esta secuencia forma parte de la capa sedimentaria de la corteza oceánica depositada en el borde continental, a unos 3000 m de profundidad, lo que supone que han experimentado un levantamiento de al menos 3 km. Los sedimentos oceánicos aparecen recubiertos por potentes secuencias volcánicas submarinas, estando el conjunto atravesado por una malla de diques subverticales y paralelos de tal densidad, con frecuencia del 90-100%, que a veces es difícil ver la roca encajante, sea ésta los sedimentos oceánicos o las secuencias volcánicas submarinas. Las series volcánicas fueron también atravesadas por masas plutónicas coetáneas, las cámaras magmáticas que alimentaron el volcanismo Mioceno de Fuerteventura.

A este peculiar conjunto se le denominó Complejo Basal precisamente por constituir la base de la isla y por su marcada complejidad. Encontrar una interpretación plausible para este complejo entramado no era fácil en los años 60 y 70 del siglo pasado. En realidad esta formación ha atraído la atención de los geólogos desde que Georg Hartung publicase en 1857 en la Sociedad Suiza de Ciencias Naturales una monografía<sup>38</sup> en la que describía una formación basal que llamó "trapp" (escalera en sueco) sienítico, atravesado por un extraordinariamente denso enjambre de diques. Sin embargo, la interpretación más llamativa apareció en Nature en 1975<sup>39</sup>, sugiriendo que este complejo basal con tal cantidad de diques debía corresponder a una intensa fase de tectónica tensional en el Terciario Medio. Se trataría de una formación parecida al complejo ofiolítico del Macizo de Troodos en Chipre, un bloque levantado de corteza oceánica que formaba parte de un eje de expansión cortical, abortado en una fase muy incipiente de desarrollo. Poco después, al datar las series volcánicas, esta idea se demostró insostenible por la enorme diferencia en edad entre los sedimentos oceánicos con fósiles del Jurásico Inferior (hace 175-180 millones de años) y el volcanismo submarino, correspondiente al Oligoceno (hace unos

---

<sup>38</sup> Hartung, G., 1857. *Die geologischen Verhältnisse der Inseln Lanzarote und Fuerteventura*. Zürich, 166 ff.

<sup>39</sup> Stillman, C.J., Fúster, J.M., Bennelbaker, M.J., Muñoz, M., Smewing, J.D., Sagredo, J., 1975. *Basal Complex of Fuerteventura (Canary Islands) is an oceanic intrusive complex with rift-system affinities*. Nature 257: 469-471.



**Fig. 6.-** A. Secuencia de sedimentos del fondo oceánico levantados y basculados aflorando en la costa oeste de Fuerteventura, en la playa de Ajui. Estos sedimentos, que muestran una alternancia rítmica de capas verdes y blancas, han sido levantados hasta aflorar en superficie por el empuje ascensional del magma. B. En el recuadro inferior aumentado se observan en detalle estas capas, las verdes ricas en clorita y las blancas en cuarzo, aportado por corrientes de turbidez del talud del continente Africano. Esta formación ha sido datada en el Cretácico por la fauna fósil asociada, lo que indica que su depósito es anterior en decenas de millones de años al inicio del volcanismo que formó Fuerteventura.

25 millones de años), lo que suponía una diferencia en edad de unos 150 millones de años que indica claramente que se trata de formaciones sin conexión alguna. Chris Stillman sintetizó la evolución de Fuerteventura y el papel que juega el denominado Complejo Basal como “una historia de cambio desde una sedimentación normal en el fondo oceánico al pie del borde continental africano, a una fase de construcción de una isla volcánica”. Por lo tanto, si separamos el componente alóctono —la corteza oceánica— lo que queda es, simplemente, una isla volcánica, con sus fases de construcción submarina y subaérea, incluyendo en estas fases las intrusiones tanto filonianas como plutónicas.

La idea de los Complejos Basales se extendió a las formaciones submarinas que afloran en La Palma y La Gomera, intuyéndose que se trataba de una formación basal común a todas las islas del Archipiélago. Hubert Staudigel y Hans Schmincke demostraron en 1984<sup>40</sup> que estos complejos basales representan únicamente la parte de crecimiento submarino de las islas, lógicamente presente en todas ellas, siendo el caso de Fuerteventura diferente en cuanto que allí aflora corteza oceánica. En todo caso, o se mantiene el término sólo para Fuerteventura, única isla en la que es aplicable, o debería abandonarse sin más. El que les habla publicó en 2001 junto a varios coautores en Estudios Geológicos<sup>41</sup> una monografía sobre las islas occidentales en que se expresaba, sin ambigüedad, que el concepto de Complejo Basal debía abandonarse por ser totalmente inadecuado y confuso, y a todas luces innecesario.

#### *La transición del volcanismo submarino al subaéreo*

En la isla de Fuerteventura se dan excepcionalmente las condiciones adecuadas para poder observar la transición del volcanismo submarino al subaéreo, un proceso estudiado en detalle recientemente por Margarita Gutiérrez y colaboradores, publicado en 2006 en el Boletín de la Sociedad Geológica Americana (GSA Bulletin)<sup>42</sup>. Las primeras manifestaciones del volcanismo son hialoclastitas y lavas almohadilladas o *pillow lavas*, depositadas a poca profundidad, como indica la vesicularidad de las lavas submarinas y la presencia de corales fósiles. Estos materiales se apoyan en discordancia sobre corteza oceánica mesozoica levantada y basculada hasta aparecer en posición casi vertical. El momento preciso de la emisión de las primeras lavas es de muy difícil definición por la ya mencionada alteración de estas rocas que impide su datación exacta, aunque las edades radiométricas obtenidas oscilan alrededor de los 20 millones de años. En cualquier caso se trata de una secuencia de lavas submarinas de unos 2 km de potencia depositadas en un ambiente de profundidad decreciente, desde valores intermedios a aguas someras. La secuencia transicional ocurre ya en condiciones cercanas a la emersión o en emersión, con fases explosivas y frecuentes avances y retrocesos en la extensión del terreno ganado

---

<sup>40</sup> Staudigel, H., and Schmincke, H.-U.. 1984, The Pliocene seamount series of La Palma, Canary Islands. *Journal of Geophysical Research* 89:11.195-11.215.

<sup>41</sup> Carracedo, J.C., Rodríguez Badiola, E., Guillou, H., De La Nuez, J. y Pérez-Torrado, F.J., 2001. Geology and Volcanology of La Palma and El Hierro, Western Canaries. *Estudios Geológicos*, 57: 1-124.

<sup>42</sup> Gutiérrez, M., Casillas, R., Fernández, C., Balogh, K., Ahijado, A., Castillo, C., Comenero, J.R., García-Navarro, E., 2006. The submarine volcanic succession of the basal complex of Fuerteventura, Canary Islands: A model of submarine growth and emergence of tectonic volcanic islands. *Geological Society of America Bulletin* 118, 7/8: 785-804.

al mar. Finalmente la isla se estabiliza y comienza la construcción del edificio emergido con el apilamiento masivo de lavas subaéreas desde el Mioceno hasta la actualidad, que recubren tanto los sedimentos oceánicos como las lavas submarinas y transicionales. Esta pauta de crecimiento de Fuerteventura debe ser común a las demás islas del Archipiélago, aunque es muy posible que sin la importancia e intensidad que los procesos de levantamiento y basculamiento del zócalo submarino tuvieron en Fuerteventura.

En La Palma se vuelven a dar las condiciones favorables para la observación del paso del estadio de monte submarino al de isla oceánica, muy bien estudiado por Hubert Staudigel, de la Scripps Institution of Oceanography en California, en su tesis doctoral. Este tránsito aflora en el interior de la Caldera de Taburiente a causa de un gigantesco deslizamiento, el mismo que formó el Valle de Aridane, en el que pronto se encajó un barranco en el lado occidental del Valle, formando por erosión remontante la Caldera de Taburiente. El fondo de esta caldera ofrece la extraordinaria oportunidad de poder observar la estructura profunda de la etapa de desarrollo submarino de la isla, al estar el volcán submarino levantado, por crecimiento endógeno e intrusión, hasta 1.500 m sobre el nivel marino actual. Esta elevación y el basculamiento de 50° al suroeste, hacia la salida de la Caldera, hace que subir por el barranco equivalga a profundizar en el volcán submarino, en un recorrido inverso al crecimiento del edificio submarino. En este trayecto ascendente se cortan al principio las brechas y lavas submarinas más someras, con restos de sedimentos oceánicos en los intersticios y fauna (corales, foraminíferos) del Plioceno (unos 4 millones de años). Al seguir avanzando hacia el interior de la Caldera se cortan lavas submarinas, típicamente pillow lavas, de aguas cada vez más profundas, lo que se aprecia por la desaparición de las vacuolas. Finalmente se llega a la parte más profunda, formada por rocas plutónicas, principalmente gabros.

Como ya vimos en Fuerteventura, la red de diques está asimismo muy desarrollada en la serie submarina de La Palma, alcanzando la máxima densidad en el centro de la Caldera y a lo largo del Barranco de las Angustias, y disminuyendo gradualmente hacia los bordes y hacia el mar. La intrusión máxima se da en los barrancos del interior y la cabecera de la Caldera, donde forma prácticamente el 100% de la roca, siempre por encima del 75%, mientras que hacia la salida los diques no llegan al 10% de la roca. De estos diques se han definido dos tipos con diferentes edades y orientaciones: los diques del grupo más antiguo aparecen rotados por el levantamiento tectónico con basculamiento del volcán submarino y, por consiguiente, son conductos de alimentación de las erupciones submarinas anteriores al basculamiento. Los del segundo grupo, se disponen verticalmente al ser posteriores al basculamiento, y por lo tanto son más recientes y corresponden a los conductos de alimentación de las erupciones subaéreas de la etapa emergida.

En esta formación submarina, que muchos denominan Complejo Basal de La Palma, se demuestra lo superfluo de este término, ya que si separamos los diferentes elementos, el "Complejo Basal" se reduce a un volcán submarino con sus diques de alimentación, y su tránsito a un volcán subaéreo, también con sus conductos eruptivos. Al no aflorar, como en Fuerteventura, el elemento alóctono, que es la corteza oceánica, todo se reduce a una isla oceánica con sus fases de crecimiento submarino y emergido. Si en las demás islas no aflora la fase correspondiente del crecimiento submarino, no es porque no exista, sino por no haber sido exhumado el núcleo de la isla por erosión o deslizamientos masivos.

Uno de los objetivos principales del estudio de una isla volcánica es reconstruir su desarrollo, utilizando para ello técnicas diversas para determinar la edad de las lavas, su composición química, polaridad geomagnética, etc. Con toda esta información pueden separarse formaciones con características comunes y definirse unidades y series volcánicas que pueden cartografiarse para elaborar mapas geológicos, y correlacionarse, para definir la estratigrafía volcánica correspondiente.

Cuando se inició este trabajo en las islas de Lanzarote y Fuerteventura se observó que los materiales emergidos más antiguos forman una sucesión tabular de coladas basálticas con frecuentes intercalaciones de materiales piroclásticos. Allí donde la erosión ha formado profundos barrancos y escarpes costeros se aprecia que estas formaciones antiguas alcanzan centenares de metros de espesor. Hans Hausen denominó a estas formaciones con el término de “Tableland series”, equivalente de mesa o *plateau*, en su monografía de 1958 sobre Fuerteventura<sup>43</sup>, aludiendo a su estructura marcadamente horizontal. Hausen consideró que la serie Tableland formó una sola masa de tierra emergida, que posteriormente se vio afectada por una tectónica de bloques, quedando como islas los bloques emergidos. Esta hipótesis quedó totalmente descartada en cuanto pudo comprobarse mediante dataciones radiométricas que estos “bloques” eran de edades muy diferentes.

El segundo intento de definir las unidades fundamentales de la estratigrafía volcánica de las Canarias lo encontramos en la monografía de Lanzarote que Fúster y colaboradores publicaron en 1968<sup>44</sup>, en la que acuñan el término de Serie Basáltica I para estas formaciones antiguas. Posteriormente, estos autores se dieron cuenta de que existían otras formaciones de lavas basálticas mucho más jóvenes, que además estaban separadas de la Serie Basáltica I por una marcada discordancia y una playa que ahora está levantada a unos 50 m, lo que les sirvió para separar como Serie Basáltica II a la formación que se apoya sobre esta playa. Más aún, observaron que la Serie Basáltica II podía a su vez subdividirse, ya que dentro de esta serie volcánica existían formaciones que descansaban sobre playas levantadas de 15-20 m y 10 m, facilitando así la definición de las subseries II-A y II-B. La seriación estratigráfica se completó separando otras dos series más, la Serie Basáltica III y Serie Basáltica IV, según se encontraran intercaladas entre las playas levantadas de 10 y 5 m, o entre las playas de 5 y 2 m.

Por resumir, esta detallada separación de series volcanoestratigráficas funcionó en Lanzarote y Fuerteventura, luego veremos por qué, con algunas dificultades en Gran Canaria y Tenerife, pero de ninguna manera sirvió para las islas occidentales de La Palma y El Hierro. Se daba la circunstancia de que no existían playas equivalentes en estas últimas islas, y que, en todo caso, si se forzaba su delimitación, las series “antiguas” de éstas eran mucho más jóvenes que las “recientes” de las islas centrales y orientales<sup>45</sup>.

---

<sup>43</sup> Hausen, H., 1958. On the geology of Fuerteventura (Canary Islands). Societas Scientiarum Fennica, Commentationes Physico-Mathematica 22, 211 pp.

<sup>44</sup> Fúster, J.M., Fernández Santín, S., Sagredo, J., 1968. Geología y Volcanología de las Islas Canarias: Lanzarote. Instituto «Lucas Mallada», C.S.I.C., Madrid, 177 págs.

<sup>45</sup> Carracedo, J.C., Rodríguez Badiola, E., Guillou, H., De La Nuez, J. y Pérez Torrado, F.J., 2001. Geology and volcanology of La Palma and El Hierro, Western Canaries. Estudios Geológicos, 57: 1-124.

Voy a permitirme aquí una corta digresión para analizar por qué sólo hay playas de arenas blancas en las islas orientales y centrales, un aspecto que, aunque no es evidente a primera vista, está igualmente relacionado con la progresión de edades en el Archipiélago y por ello con la existencia en Canarias de un punto caliente. La presencia de playas de arenas blancas sólo en la parte oriental del Archipiélago afecta decisivamente a la distribución del turismo, que se concentra en estas islas, siendo éste muy inferior en las islas occidentales, que sólo tienen playas de cantos y arenas basálticas negras. Pero ¿qué tiene que ver la edad de las islas con las características de sus playas? Además de con la edad tiene que ver con un espectacular cambio climático, asunto que tanto preocupa en estos tiempos. Siguiendo las investigaciones de Joaquín Meco<sup>46</sup>, las Canarias tuvieron un clima ecuatorial constantemente cálido durante al menos cinco millones de años (de 9 Ma a unos 4 Ma), parecido al que ahora existe en el Caribe o el Golfo de Guinea. Acorde con ese clima florecían en el mar de Canarias especies fósiles tropicales. El cierre del canal de Panamá por el choque de varias placas tectónicas y la formación de un arco volcánico es uno de los más importantes acontecimientos geológicos en los últimos millones de años. Al cortar el paso del agua del Atlántico al Pacífico, las corrientes del Atlántico se vieron obligadas a desplazarse hacia el norte, originándose la corriente del Golfo que dio lugar al cambio climático en Canarias hacia un clima más frío que acabó con las especies tropicales, dando lugar a abundantes depósitos de arenas biogénicas, fuente de las actuales playas de arenas blancas. Naturalmente, este cambio no afectó a las islas que aún no se habían formado, lo que explica que no haya este tipo de arenas en La Palma y El Hierro, que emergieron más tarde.

Volvamos a las dificultades encontradas en los años 60 en la definición, empleando precisamente estas playas, de una estratigrafía volcánica que fuera aplicable a todo el Archipiélago. La solución al problema podía estar en dejar de considerar a las Canarias como islas peculiares y distintas a las demás islas oceánicas del planeta, visión alentada por su asociación con el continente africano y su tectónica, y adoptar los conceptos y la terminología desarrollados en otras islas oceánicas cuyo estudio geológico estaba mucho más avanzado en la época, principalmente las Islas Hawaii.

Harold Stearns fue el primero en plantear las principales etapas de desarrollo de las islas oceánicas, en este caso las Islas Hawaii, publicando estas ideas en 1946 en una monografía de la División de Hidrografía de la isla de Hawaii<sup>47</sup>. Según Stearns, al envejecer, las islas pasan de una fase inicial de gran producción volcánica a otra final de volcanismo mucho más reducido. En la primera el crecimiento sobrepasa con creces la pérdida de masa por erosión o procesos catastróficos (por ejemplo los deslizamientos gigantes). Esta fase, eminentemente constructiva, ocurre durante la etapa inicial en *escudo* (del término original "*shield stage*", por el perfil que adoptan las islas en esta fase, parecido a un escudo romano invertido), en la que las tasas eruptivas son más elevadas y se forma el grueso del edificio insular, tanto en su parte sumergida como emergida (Fig. 7A). Esta

---

<sup>46</sup> Meco, J., Petit-Maire, N., Guillou, H., Carracedo, J.C., Lomosehitz, A., Ramos, A.J.G. & Ballester, J., 2003. Climatic changes over the last 5,000,000 years as recorded in the Canary Islands. *Episodes* 26, 133-134.

<sup>47</sup> Stearns, H.T., 1946. *Geology of the Hawaiian Islands: Hawaii (Terr.) Division of Hydrography Bulletin* 8, 106 p.

fase de crecimiento se va agotando progresivamente, y aunque el edificio insular continúa creciendo, pasa sin embargo por periodos de menor desarrollo e incluso disminución de tamaño, ya que las tasas eruptivas son considerablemente menores y decrecientes y las erupciones mucho más espaciadas; a esta fase se la conoce como *post-escudo*. Al finalizar este periodo, la isla, que se va apartando progresivamente de la fuente magmática debido a la deriva de la placa sobre la que se sustenta, entra en un estadio de reposo eruptivo y erosión, que puede no existir, ser corto o durar millones de años (Fig. 7B).

Para terminar, hay una fase de *rejuvenecimiento*, con erupciones más escasas que recubren el relieve erosivo originado durante el periodo de quiescencia (Fig. 7C). En esta fase de volcanismo reducido y esporádico las erupciones se mantienen durante largos

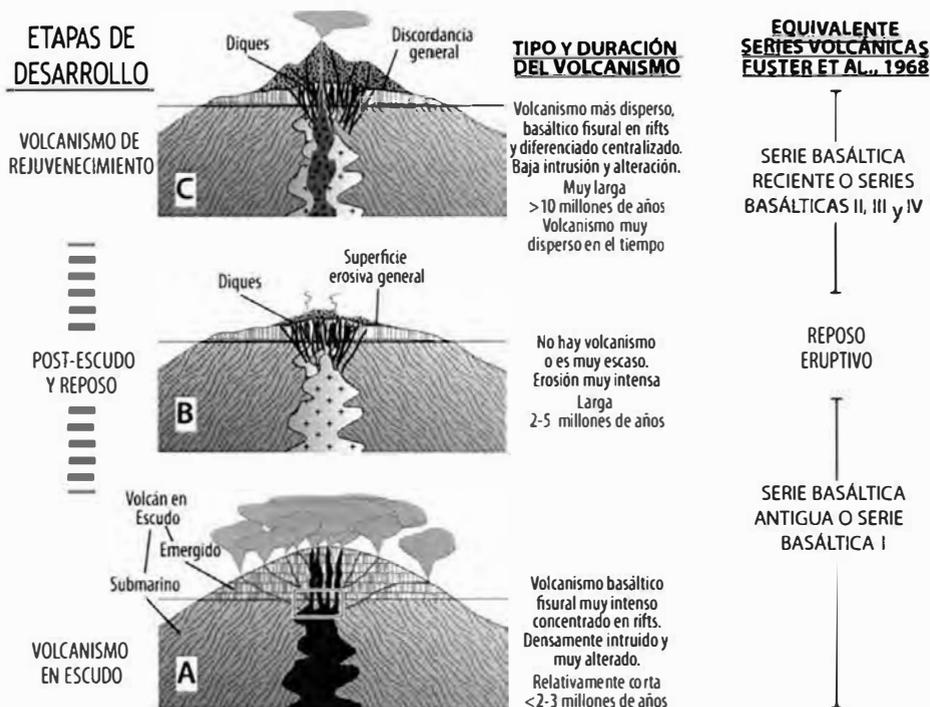


Fig. 7.- La definición de unidades volcano-estratigráficas correlacionables en todo el ámbito de las Canarias es inviable ateniéndose a las unidades definidas por Fúster y col. en 1968 (columna derecha de la figura). Es evidente que las "Series Antiguas" así definidas en La Palma o El Hierro serían mucho más recientes que las "Series Recientes de Lanzarote o Fuerteventura. Para soslayar estos inconvenientes es preferible basar esa división estratigráfica en unidades relacionadas con las etapas de desarrollo de las islas oceánicas, definidas en las Islas Hawaii en 1946 por H.T. Stearns en su *Geology of the Hawaiian Islands* (columna izquierda). Esta básica separación de unidades se complementa con la definición, cuando sea posible, de diferentes volcanes. Por ejemplo, en La Palma, toda ella en la fase en escudo, pueden separarse varios volcanes: Garafía, Taburiente, Cumbre Nueva y Cumbre Vieja, en los que se puede afinar mucho más en la datación y correlación estratigráfica.

periodos de tiempo y se solapan entre las diversas islas. Se da el caso de que ocurran erupciones volcánicas no sólo en las islas más jóvenes sino también en las antiguas. Basándose en la edad de las erupciones del periodo de rejuvenecimiento a lo largo de la alineación de las Islas Hawaii, David Clague y David Sherrod afirman, en un reciente libro sobre el volcanismo hawaiano<sup>48</sup>, que “la duración del periodo de rejuvenecimiento en las Islas Hawaii indica que no pueden descartarse futuras erupciones en las islas más antiguas del Archipiélago, aunque la baja frecuencia reduce el riesgo eruptivo a niveles muy bajos”. Por ello sorprende la obstinada apelación a las erupciones históricas de Lanzarote como un argumento que invalide la aplicación a Canarias del modelo de punto caliente.

Finalmente las islas entran en un dilatado periodo en que el volcanismo es cada vez más reducido y la erosión más importante. Los edificios, bajos y estables, se desmantelan por la erosión del mar, la lluvia y el viento hasta convertirse en escollos y finalmente desaparecer bajo el mar como montes submarinos, lo que ya ha ocurrido con la parte más antigua de la Provincia Volcánica Canaria.

Si comparamos ahora las unidades estratigráficas definidas inicialmente en Canarias y su contrapartida en las Islas Hawaii vemos que la Serie Basáltica I de Canarias se corresponde con la fase en escudo y post-escudo de Hawaii, mientras que las demás fases de Canarias, las Series Basálticas II, III y IV lo hacen con el periodo de rejuvenecimiento post-erosivo (ver Fig. 7). Esta nueva definición de unidades formulada en las Islas Hawaii tiene múltiples ventajas: informa sobre etapas reales de desarrollo de las islas y es de carácter universal, válida para todas las islas oceánicas. Ahora podemos comprender por qué no era factible extender a las islas occidentales la división en series de Fúster y colaboradores: definir en La Palma y El Hierro estas series es imposible puesto que todo el volumen actual de estas islas corresponde a la etapa inicial en escudo, que aún no ha concluido. Es decir, en La Palma y El Hierro sólo existiría la Serie Basáltica I de Fúster y colaboradores. Tuve ocasión de proponer la adopción de esta volcanoestratigrafía en las Islas Canarias en el artículo publicado en 1998<sup>49</sup>, y más claramente aún en otro artículo comparando la geología de los archipiélagos de Canarias y Hawaii<sup>50</sup>.

## FORMAS DEL RELIEVE Y SU GÉNESIS

La tectónica de placas ha aportado conceptos que permiten comprender la fuerza última, el motor que genera el relieve en ambientes continentales. Esta teoría explica de forma convincente los grandes procesos que afectan a la corteza terrestre (los terremotos, los volcanes, la formación de las montañas y cordilleras, etc.), que no son sino el resulta-

---

<sup>48</sup> Clague, D.A. and Sherrod, R.D., 2014. Growth and degradation of Hawaiian volcanoes. In: Characteristics of Hawaiian volcanoes. Editors: Michael P. Poland, Taeko Jane Takahasi and Claire M. Landowski. U.S. Geological Survey Professional Paper 1801: 97-145.

<sup>49</sup> Carracedo, J.C., Day, S., Guillou, H., Rodríguez, E., Canas, J.A., Pérez-Torrado, F.J., 1998. Hotspot volcanism close to a passive continental margin. *Geological Magazine* 135: 591-604.

<sup>50</sup> Carracedo, J.C., 1999. Growth, structure, instability and collapse of Canarian volcanoes and comparisons with Hawaiian volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 94: 1-19.

do del movimiento relativo de las placas litosféricas y la liberación de la energía cinética acumulada cuando las placas chocan, ya que aunque se mueven lentamente, apenas unos pocos cm por año, su masa es colosal. Esta liberación de energía cinética puede ser en forma de calor (volcanismo) o deformación (plegamientos, fallas, terremotos), generando las grandes estructuras del relieve del planeta.

El relieve de las islas volcánicas oceánicas tiene un origen muy diferente. Lejos de los bordes de placa activos y aislados de la energía liberada en ellos, su causa primera hay que buscarla en un proceso completamente diferente que no es otro que el magmatismo provocado por la acción de una anomalía térmica del manto o punto caliente. En estas islas es la energía térmica la que proporciona el motor que puede actuar como un gigantesco gato hidráulico, levantando, basculando e incluso plegando formaciones volcánicas, acumular centros eruptivos para formar dorsales, lo más parecido en Canarias a las cordilleras continentales, o construir edificios volcánicos tan altos que se vuelven inestables y se desploman, configurando cuencas de deslizamiento que asemejan de alguna manera a los valles de ambientes continentales.

Quede claro que estas semejanzas son meramente aparentes, porque los procesos que las originan son totalmente diferentes, con una disparidad fundamental en el tiempo necesario para su formación: millones de años para las estructuras del relieve continental, apenas unas decenas de miles de años, y a veces sólo unos instantes, para las de las islas oceánicas. Dentro de estas últimas, vamos a analizar someramente las dorsales o rifts, y las cuencas de deslizamiento gravitatorio, analizando asimismo sus evidentes interrelaciones<sup>51</sup>.

## LOS RIFTS O DORSALES Y LOS DESLIZAMIENTOS GIGANTES

Estas espectaculares “cordilleras”, de origen exclusivamente volcánico y conocidas en Canarias como dorsales, juegan un papel fundamental en el desarrollo de las islas y en la configuración de su relieve. Fueron inicialmente descritas para las Islas Hawaii en 1972 por Richard Fiske y Dale Jackson en las actas de la Royal Society de Londres<sup>52</sup> como “miles de diques formados por inyección lateral de magma desde un conducto volcánico central”. Posteriormente, George Walker publicó una descripción más detallada del “complejo de diques” del volcán Koolau, en la isla de Oahu<sup>53</sup>. Durante la realización de mi tesis doctoral tuve ocasión de investigar la dorsal NE de Tenerife, la Dorsal de La Esperanza, contando con una valiosa ventaja respecto a los citados ilustres volcanólogos, ya fallecidos: considerar como elementos de observación geológica la existencia de centenares de galerías excavadas para aprovechar el agua subterránea, técnica en la que tuve la fortuna de iniciarme con el que mejor conocía el tema, el geólogo José Manuel Navarro Latorre,

---

<sup>51</sup> Carracedo, J.C., 2014. Structural collapses in the Canary Islands. In: Francisco Gutiérrez y Mateo Gutiérrez (Editors), *Landscapes and landforms in Spain*. Springer. 347 pp.

<sup>52</sup> Fiske, R.S. & Jackson, E.D., 1972. Orientation and growth of Hawaiian volcanic rifts. *Proceedings of the Royal Society of London, ser. A*, v. 329: 299-326.

<sup>53</sup> Walker, G. P. L., 1987. Volcanism in Hawaii. The dike complex of Koolau Volcano, Oahu: Internal structure of a Hawaiian rift zone. *U. S. Geol. Surv. Prof. Pap.* 1350:961-993.

recientemente fallecido. Estas galerías, inexistentes en las Islas Hawaii, donde sólo se utilizan pozos, permiten la observación de la estructura de la dorsal prácticamente a cualquier profundidad. De estos trabajos y otros realizados en dorsales similares en La Palma y El Hierro, deduje que la actividad eruptiva reciente (últimos miles de años) y prácticamente toda la histórica de estas islas de La Palma, El Hierro y Tenerife, se ha concentrado en estas dorsales, generando por acumulación crestas montañosas alargadas con configuración en tejado a dos aguas (Fig. 8). Los diques no son otra cosa que los conductos de alimentación de centenares de centros eruptivos fisurales, agrupados en las dorsales, acumulación que produce las crestas topográficas.

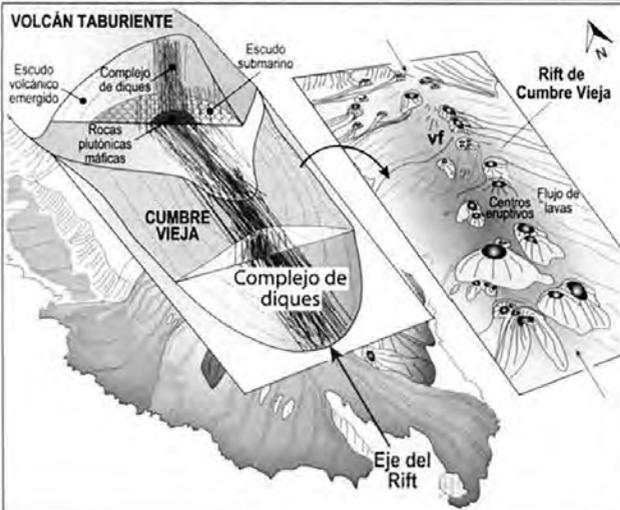
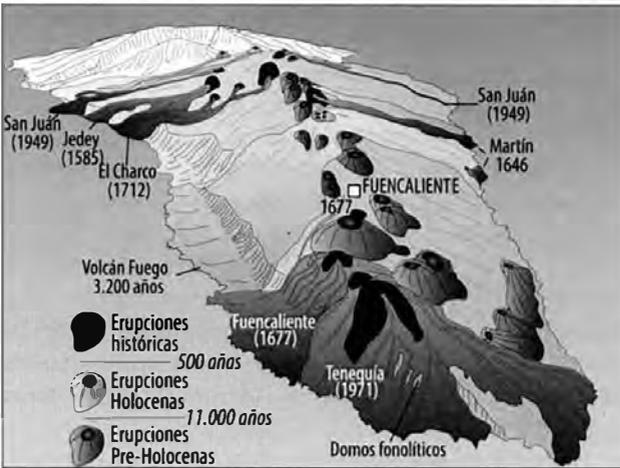
Un interesante aspecto que requiere clarificación es la disposición en algunas islas de un sistema de dorsales configuradas con una geometría de estrella regular de tres puntas y ángulos de  $120^\circ$ , disposición que corresponde a la fracturación de mínimo esfuerzo. En 1992 publiqué un artículo en el *Journal of Volcanology and Geothermal Research* modelizando esta disposición de las dorsales en estrella tipo “Mercedes-Benz”<sup>54</sup>. Este modelo se basa en que el magma necesita perforar la corteza oceánica para formar la isla. Para ello, el magma boyante tiene que ejercer un empuje ascendente particularmente elevado en esta fase inicial. Se produciría así un abombamiento o *doming* y, eventualmente, una fracturación (*fracturing*) de la corteza, que, a esta escala, puede considerarse isótropa. En estas condiciones es factible pensar que la fractura inicial sea la de mínimo esfuerzo, que adopta una configuración en estrella de tres brazos a  $120^\circ$  (Fig. 9). Una vez fracturada la corteza, la disposición de estas fracturas condiciona las siguientes penetraciones de magma formando un apretado enjambre de diques, entre los que se inyectan las sucesivas intrusiones (como un cuchillo entre las hojas de un libro). En definitiva, estas fracturas iniciales parecen controlar la construcción de la isla y sus dorsales. En esa misma línea expuse un modelo que relaciona el desarrollo de las dorsales y la generación de deslizamientos gigantes<sup>55</sup>, el proceso que ha configurado las grandes estructuras calderiformes del Archipiélago: Los valles de La Orotava y Güímar, el arco de Taganana en Tenerife, El Julan y El Golfo en El Hierro, y la Caldera de Taburiente en La Palma.

Parece intuitivo que la acumulación de centenares de diques, inyectados a presión como cuñas, necesariamente incrementa progresivamente la resistencia de la roca caja a acomodar nuevas inyecciones, lo que inhibiría la penetración de más diques en un momento dado. Si esta inyección prosigue ha de ser cambiando el régimen compresivo que se daría por la múltiple inyección, en otro distensivo, que dé espacio para nuevos diques. Una explicación podría muy bien ser la correlación entre el crecimiento de las dorsales y su inestabilidad: cada nuevo dique expande la dorsal, separando generalmente uno de sus flancos, que se torna móvil. Llegado un punto crítico de desplazamiento del flanco móvil actúa la gravedad, pudiendo llegar a colapsar. Es obvio pues que los deslizamientos gigantes ocurren en los flancos de las dorsales y son provocados por éstas.

---

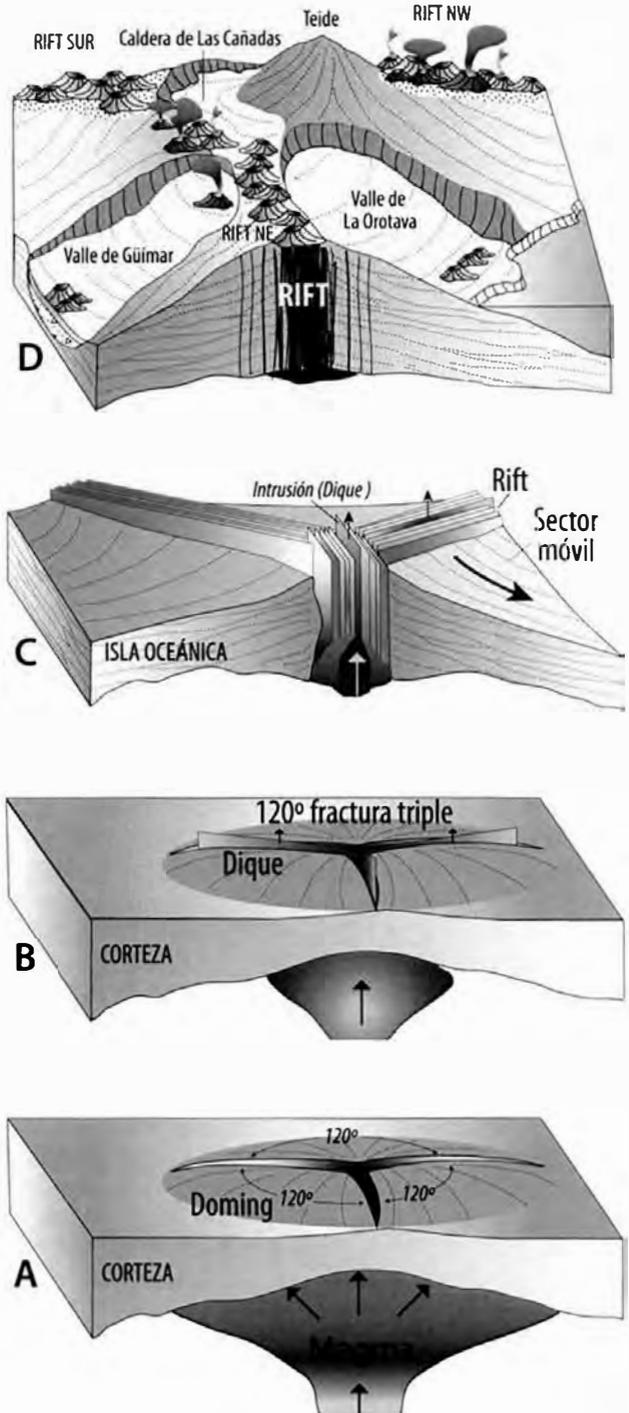
<sup>54</sup> Carracedo, J.C., 1994. The Canary Islands: an example of structural control on the growth of large oceanic island volcanoes. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 60, 225-241.

<sup>55</sup> Carracedo, J.C., 1996. A simple model for the genesis of large gravitational landslide hazards in the Canary Islands. In: W. McGuire, J. Neubeck & A. Jones (eds.) *Volcano Instability on the Earth and other Planets*. Geological Society of London, Special Publication, N° 110: 125-135.



**Fig. 8.-** Aspecto y estructura profunda de la dorsal profunda de la dorsal de Cumbre Vieja. Las dorsales o zonas de rift constituyen una de las estructuras más significativas del volcanismo en islas oceánicas, particularmente definidas y relevantes en Canarias. Estas persistentes estructuras, formadas por la acumulación de centros eruptivos formando crestas a dos aguas, controlan el crecimiento de las islas, tal vez desde sus inicios, y generan las principales formas del relieve.

**Fig. 9.-** Esquema que ilustra el proceso de formación de las dorsales y los megadeslizamientos gravitacionales. En A, el empuje ascendente de la pluma del manto, más caliente que su entorno, produce un abombamiento (*doming*) y, eventualmente, fractura la corteza (*fracturing*). La lentitud y continuidad del proceso hace que esta fracturación adopte la configuración de mínimo esfuerzo, que es una fractura triple con ángulos de  $120^\circ$  (en estrella "Mercedes Benz"). El magma se inyecta por estas fracturas en forma de diques, parte de éstos como conductos de alimentación de las erupciones que ocurren en superficie, en la vertical de las fracturas. Este proceso acumulativo genera estructuras en tejado a dos aguas, los rifts o dorsales. La progresiva inyección culmina con el desplazamiento lateral de uno de los sectores entre fracturas, que al movilizarse permite la continuidad de las inyecciones hasta que el desplazamiento supera un límite y se desgaja y colapsa por gravedad, generando un deslizamiento lateral. Se forman así las estructuras más significativas del relieve en islas oceánicas: los rifts, como forma positiva del relieve, y los deslizamientos y sus cuencas, como formas más conspicuas de relieve negativo.



Pero otro aspecto importante de las dorsales es que, al acumular los centros eruptivos y las erupciones, son zonas de máximo riesgo volcánico. Son asimismo responsables de desencadenar los deslizamientos gigantes y tsunamis asociados, aunque estos procesos catastróficos tengan una recurrencia que no se mide en decenas o centenares de años como las erupciones, sino en decenas o centenares de miles de años. Los geólogos estamos acostumbrados a usar una escala de tiempo que utiliza miles o millones de años, hasta el punto que consideramos “reciente” una erupción ocurrida un par de cientos de miles de años atrás. Esta escala es totalmente diferente de la que se emplea en la vida real, por lo que hay que tener mucho cuidado al dirigirse al público a través de los medios de comunicación. No es lo mismo anunciar sin más la posibilidad de que ocurra algo catastrófico, que explicitar que este fenómeno puede ocurrir dentro de muchos miles de años.

## LOS ESTRATOVOLCANES FÉLSICOS

Uno de los elementos geológicos más genuinamente canarios son los estratovolcanes félsicos, magníficamente representado en la actualidad por el Teide, la tercera estructura volcánica más alta del planeta. Aunque el Teide es el único estratovolcán actualmente activo en Canarias, ha habido otros volcanes similares como el Roque Nublo<sup>56</sup>, en Gran Canaria, y en Fuerteventura<sup>57</sup>, y es lógico pensar que estos volcanes centrales félsicos hayan ocurrido en las islas centrales y orientales, y puedan levantarse en las islas occidentales en etapas futuras de su desarrollo.

Los estratovolcanes félsicos abundan en los bordes convergentes de las placas litosféricas, pero son raros en las islas oceánicas. La mayoría de éstas tienen una historia geológica excesivamente corta que inhibe los procesos de diferenciación magmática que genera los magmas félsicos. Este tipo de volcanes no existe en las Islas Hawaii, o son de naturaleza basáltica, como el volcán Pico, en la isla del mismo nombre en las Azores, o Pico do Fogo, en Cabo Verde.

En las Canarias se dan los dos supuestos necesarios para generar estratovolcanes félsicos tan espectaculares como el Teide: por una parte las condiciones que facilitan la diferenciación magmática que genera los magmas félsicos, y por otra las que filtran los magmas basálticos de mayor densidad, permitiendo únicamente la erupción de los magmas diferenciados más ligeros. Las condiciones favorables para la diferenciación magmática se dan en Canarias —por ejemplo en Tenerife—, por el largo periodo de reposo eruptivo entre la construcción de los grandes volcanes en escudo basálticos y el volcanismo de rejuvenecimiento (en Tenerife de unos 5 millones de años). En este largo periodo sin actividad eruptiva los magmas evolucionan porque los componentes más pesados se decantan, enriqueciéndose progresivamente el magma con componentes más ligeros y con mayor proporción de gases disueltos que confieren a estas erupciones un alto poder

---

<sup>56</sup> Pérez Torrado, F., Carracedo, J.C. and Mangas, J. 1995. Geochronology and stratigraphy of the Roque Nublo Cycle, Gran Canaria, Canary Islands. *Journal of the Geological Society, London*, 152: 807-818.

<sup>57</sup> Stillman, C.J. 1999. Giant Miocene landslides and the evolution of Fuerteventura, Canary Islands. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 94 (1-4), 89-104.

explosivo. En Tenerife, estos magmas evolucionados produjeron varios ciclos de erupciones muy explosivas (Plinianas), que acabaron construyendo el volcán Las Cañadas. La última fase eruptiva de este volcán culminó con un gran deslizamiento que produjo la Caldera de Las Cañadas, desarrollándose a continuación el Teide anidado en su interior<sup>58</sup>. Estos deslizamientos, catastróficos y posiblemente instantáneos, es lógico que sucedan coincidiendo con fases muy intensas de volcanismo (intrusiones y erupciones volcánicas), capaces de crear las condiciones de inestabilidad que eventualmente propician el colapso de una parte del edificio volcánico. Se produce así una súbita descompresión y la salida violenta del magma, que se apila anidado en la cuenca originada construyendo un edificio centralizado. Los magmas implicados, inicialmente de naturaleza basáltica, se emplazan en reservorios someros donde se acumulan magmas cada vez más diferenciados (traquitas, fonolitas).

Para explicar que estos estratovolcanes acaben siendo félsicos se requiere un último proceso que filtre los magmas basálticos densos y permita solamente las erupciones félsicas, más ligeras. Se ha comprobado experimentalmente que existe un límite en la altura (alrededor de los 3000 m) a la que el magma puede ascender, dependiendo de la sobrepresión eruptiva, con un papel primordial de los gases y su expansión al disminuir la profundidad, y la densidad del magma. El resultado es bastante intuitivo: al tiempo que el volcán crece, el peso de las lavas más densas acaba superando la sobrepresión eruptiva y estas erupciones basálticas cesan<sup>59</sup>. Sin embargo, si existen magmas diferenciados, más ligeros, estas erupciones continúan hasta que la altura del edificio impide cualquier erupción por el cráter en la cima del edificio volcánico, en cuyo caso, si aún hay magmas ligeros en condiciones eruptivas, éstos se emiten en el perímetro basal del edificio.

Estas condiciones, válidas para los estratovolcanes en general, reflejan perfectamente la historia evolutiva del Teide (Fig. 10A). Si bien el Teide es un elemento bien definido desde el punto de vista geográfico –el edificio volcánico desarrollado sobre el fondo de la Caldera de Las Cañadas–, no lo es desde la óptica geológica. El complejo volcánico está compuesto por el propio estratovolcán, el volcán gemelo de Pico Viejo, y una serie de domos félsicos en la base perimetral de ambos volcanes.

Todas estas estructuras volcánicas pueden separarse del Volcán Las Cañadas por una isócrona, el deslizamiento gravitatorio de hace unos 200.000 años que originó la cuenca sobre la que se construyó el complejo del Teide. Pero para completar el sistema volcánico es preciso contemplar asimismo los rifts NO y NE, ya que aunque las diferencias entre las erupciones basálticas de estos rifts y las fonolíticas del estratovolcán central son evidentes, entre estos extremos del sistema bimodal existe toda una gama transicional en la que la composición de las lavas cambia gradualmente, haciendo que la separación neta de los rifts y el complejo central félsico sea inviable. Dicho de otro modo, desde el punto de vista geológico (petrográfico) no puede trazarse una línea neta de separación del complejo central y los rifts, ya que el Complejo Teide-Pico Viejo es una combinación de magmas basálticos y fonolíticos y todos sus términos intermedios (Fig. 10B).

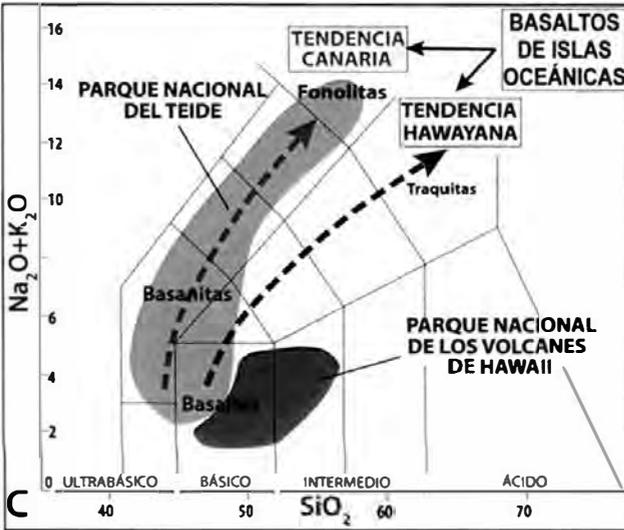
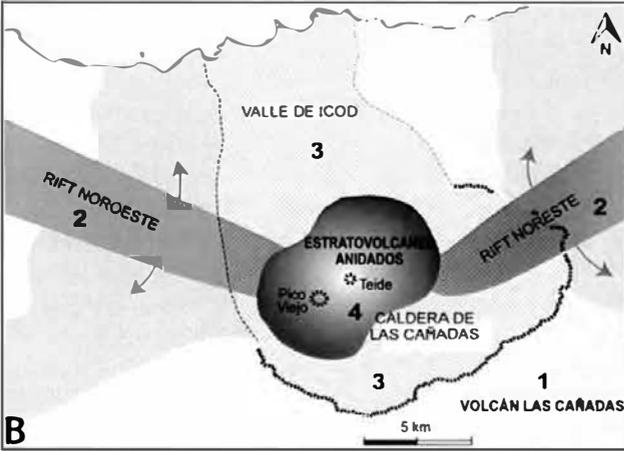
---

<sup>58</sup> Carracedo, J.C. and Troll, V.R., 2013. Teide volcano – Geology and eruptions of a highly differentiated oceanic stratovolcano. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, p. 234.

<sup>59</sup> Davidson, J.P. and de Silva, S., 2000. Composite Volcanoes. In: Haraldur Sigurdsson (ed) Encyclopedia of Volcanoes. San Diego: Academic Press, pp. 663-681.



**Fig. 10.-** A. Los espectaculares estratovolcanes sálicos son característicos de las Canarias, donde además del Teide y Pico Viejo, en Tenerife (imagen Google Earth), se han documentado en otras islas, como el Roque Nublo y posiblemente en Fuerteventura. B. Aunque el Teide es una unidad geográfica no lo es desde la perspectiva volcanológica, ya que las dorsales NO y NE y el Teide interactúan y sus límites son difusos. C. La coexistencia de las dorsales, alimentadas periódicamente por magmas profundos de carácter máfico (basaltos), con la cámara magmática relativamente superficial de magmas diferenciados de composición fonolítica, ha dado lugar a la erupción de ambos tipos de magmas y sus combinaciones y mezclas. Esta es la explicación de la variada gama de formas y estructuras volcánicas, inexistentes en otros archipiélagos oceánicos, donde los magmas son de carácter máfico. Tal diversidad ha sido un elemento fundamental en la inclusión del Parque Nacional del Teide en la lista del Patrimonio Mundial, complementando al Parque Nacional de los Volcanes de Hawaii.



Esta complejidad magmática contrasta con la simplicidad de la mayoría de las islas oceánicas, con un neto predominio de los basaltos. Si comparamos, por ejemplo, las erupciones del Parque Nacional del Teide con su homólogo de Hawaii, vemos que en el primero se encuentran todos los términos de la serie de los Basaltos de Islas Oceánicas, desde los términos basálticos hasta las fonolitas. Sin embargo, en el Parque Nacional de Hawaii sólo aparecen los términos basálticos menos evolucionados (Fig. 10C). Este hecho origina en Canarias una gran diversidad de mecanismos eruptivos y, en consecuencia, una amplia gama de productos y estructuras volcánicas que no existen en Hawaii<sup>60</sup>, hecho que facilitó en gran manera la inclusión del Parque Nacional del Teide en la lista del Patrimonio Mundial en 2007<sup>61</sup>.

La observación de la estructura profunda del complejo del Teide es posible a través de las numerosas galerías existentes en la cara norte del edificio volcánico. Estas galerías han permitido definir mediante dataciones radiométricas la edad de las etapas de construcción del Teide, además de la evolución de los magmas implicados (Fig. 11A,B,C). Se ha determinado así que la construcción de este estratovolcán comenzó inmediatamente después del deslizamiento gravitacional con una fase inicial de lavas basálticas que evolucionaron con cierta rapidez hacia términos intermedios por la interacción de los magmas basálticos de origen profundo con los más someros y diferenciados. Estas lavas basálticas, muy fluidas, rellenaron gran parte de la cuenca de deslizamiento y llegaron a la costa aumentando la superficie de la isla. Finalmente, en una etapa relativamente tardía (hace unos 50.000 a 30.000 años), se emitieron únicamente lavas fonolíticas, las que actualmente forman la capa exterior del estratovolcán y alcanzaron asimismo la costa norte. La actividad posterior del Teide se ralentiza hasta la ocurrencia de la última erupción medieval de las Lavas Negras.

Es muy posible que coincidiendo con la culminación del Teide hace unos 32.000 años, las dificultades encontradas por las lavas basálticas para ascender a la cima del volcán originaran una desviación hacia su flanco oeste, comenzando la construcción del Pico Viejo como un volcán adventicio que siguió la misma pauta, con una primera fase basáltica para pasar a lavas intermedias y fonolíticas, ralentizando su actividad drásticamente a partir de hace unos 17.000 años (Fig. 11D). Aunque se había supuesto el Pico Viejo como más antiguo que el Teide, apoyándose éste sobre aquél, en realidad es al contrario. Los 3100 m de altura de Pico Viejo no son reales, ya que ha crecido sobre la falda del Teide a unos 3000 m de altura. La localización del Pico Viejo al oeste del Teide explica por otra parte la extensión del área cubierta por sus lavas, particularmente las iniciales de gran fluidez (basaltos pahohoe), que rellenaron la parte occidental de la Caldera de Las Cañadas desbordándola por el oeste y alcanzando la costa tanto por el norte como al sur.

Aunque no puede lógicamente descartarse la reactivación de estos estratovolcanes su historia geológica parece indicar que ambos han evolucionado progresivamente hacia una disminución de su actividad eruptiva y un lapso mayor entre erupciones.

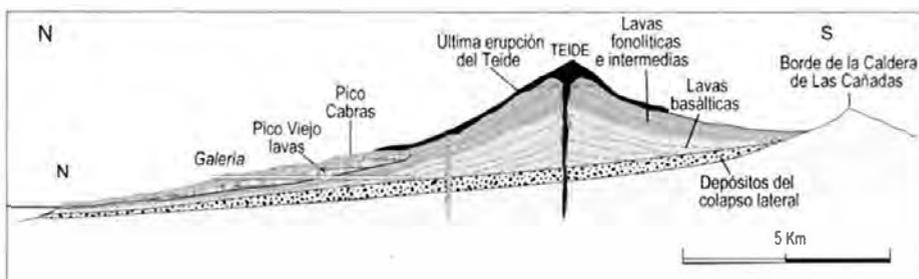
---

<sup>60</sup> Carracedo, J.C., Troll V.R. and Wiesmaier S., 2013. Teide Volcano - the emblematic volcano of the Canaries. *Geology Today* 29: 165-168.

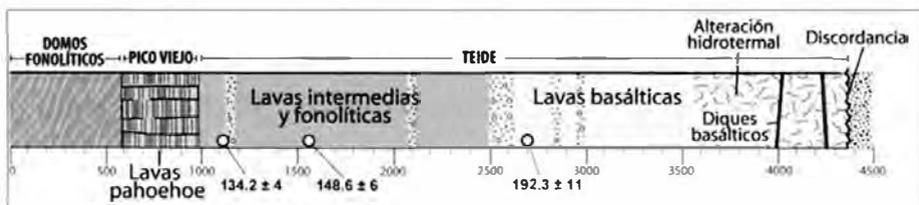
<sup>61</sup> Carracedo J.C. 2008. Outstanding geological values: the basis of Mt Teide's World Heritage nomination. *Geology Today*. 24(3): 104-111.



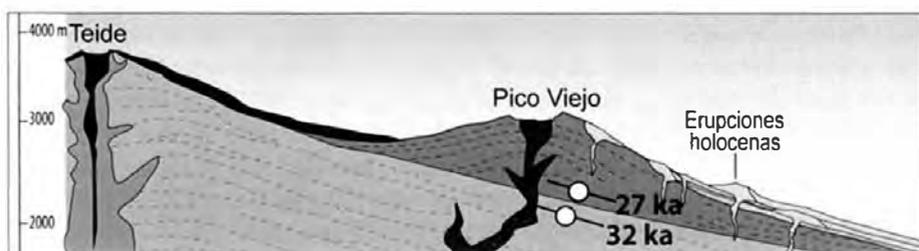
A



B



C



D

Fig. 11.- A. La estructura profunda del complejo volcánico del Teide es observable a través de numerosas galerías, especialmente abundantes en la cara norte del edificio volcánico. Se ha podido determinar así la edad y composición de las formaciones basales y su evolución durante el crecimiento del volcán. B. En el corte geológico se muestran las edades  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  obtenidas, que indican un rápido

## LOS RIESGOS NATURALES DE CANARIAS

Quisiera haber tenido espacio para tratar más detenidamente este tema de los riesgos naturales de Canarias asociados al volcanismo, que además influye, muchas veces directamente, en las condiciones de vida de la población y la economía de las Islas. Se me ha criticado por haber asegurado que las erupciones en Canarias son “tranquilas”, sacando esta valoración coloquial del contexto en que la hice. Naturalmente que las erupciones en Canarias, tomadas en términos generales, no son todas tranquilas. Es más, en la historia geológica de las Canarias, principalmente en Tenerife y Gran Canaria, han ocurrido erupciones de las más violentas posibles, incluyendo erupciones plinianas de enorme poder destructivo, que han debido poner en riesgo la supervivencia de la mayoría de las especies vivas en numerosas ocasiones. Pero no en el periodo histórico, que es al que me refería, y en el que se pueden considerar “tranquilas”, al menos por sus efectos, relativamente moderados, y por la ausencia de víctimas. Y es poco probable, afortunadamente, que el estilo eruptivo cambie en nuestro horizonte de vida, aunque lógicamente esto no pueda ni deba descartarse.

Esta apreciación “a la baja” de la peligrosidad del volcanismo en Canarias en este momento geológico tiende por otra parte a tratar de contrarrestar lo mucho que se ha exagerado sobre el peligro de erupciones, terremotos y hasta deslizamientos gigantes, atemorizando a la población y los millones de visitantes que fundamentan el principal recurso económico de las Canarias<sup>62</sup>. Poco han ayudado indicaciones en este sentido en los medios de difusión, incluso internacionales, que han llegado a conocer injustificadamente a Tenerife como “Terrorife” o especular sobre el desplome del Teide o de media isla de La Palma, un atractivo tema para los medios, que ha servido como argumento de documentales de televisión y novelas. Conviene recordar que incluso se llegó a poner fecha, sin fundamento alguno, a una erupción del Teide (en octubre de 2004), que evidentemente nunca se ha producido<sup>63</sup>.

---

<sup>62</sup> Pérez Martínez, V. M. (2007). Algunos aspectos deontológicos en la cobertura de informaciones científicas. Estudio de caso: “Crisis volcánica” del Teide. *Revista Latina de Comunicación Social*, 62. [http://www.ull.es/publicaciones/latina/200709Perez\\_Martinez.htm](http://www.ull.es/publicaciones/latina/200709Perez_Martinez.htm)

<sup>63</sup> [www.laprovincia.es/sociedad/2011/10/10/crisis-volcanica.../406893.html](http://www.laprovincia.es/sociedad/2011/10/10/crisis-volcanica.../406893.html)

---

do crecimiento inicial a partir de lavas basálticas, evolucionando a lavas de composición intermedia y, finalmente, fonolíticas. La galería mostrada en C (Salto del Frontón) es una de las muchas existentes en la zona, aunque ésta es una de las que más profundamente penetran en la base del edificio volcánico. Las erupciones del Teide continuaron al menos hasta hace unos 32.000 años, la edad determinada en coladas fonolíticas del cantil costero de la Playa de San Marcos, en Icod. A partir de esa edad parece que la actividad del Teide se ralentiza o cesa, hasta la ocurrencia del último episodio eruptivo de lavas de fonolitas obsidiánicas (las Lavas Negras), datado por <sup>14</sup>C entre 660 y 940 A.D. (en la Alta Edad Media). D. A partir de unos 27.000 años se emitieron las lavas del Pico Viejo, y las coladas fonolíticas de los domos periféricos, el último de éstos, Roques Blancos, hace unos 236 años. Esta relación de edades demuestra que Pico Viejo es un estratovolcán de escasa altura real, aunque el haber crecido apoyado en el flanco del Teide le ha permitido alcanzar 3100 m en su cima.

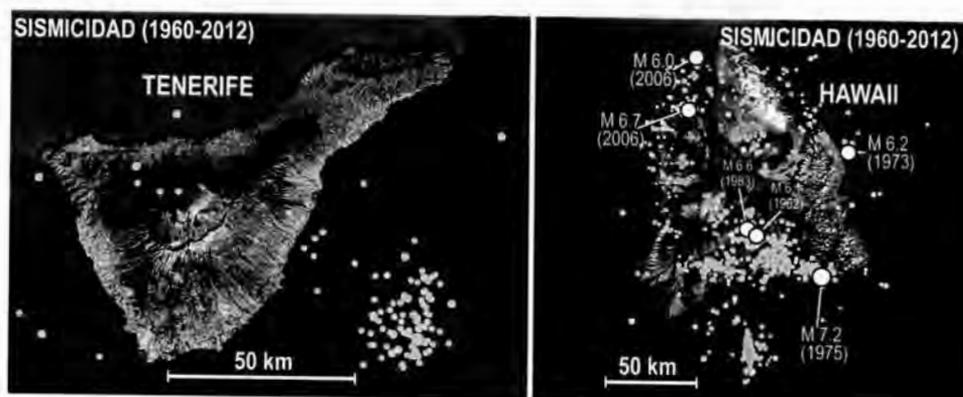
Para sintetizar mi opinión sobre este tema voy a comparar las Canarias con otro archipiélago oceánico que es el paradigma de islas paradisíacas: las Islas Hawaii ¿Quién renunciaría a unas vacaciones en Hawaii si pudiera viajar allí? Pues bien, mientras que las Canarias se han formado junto a un borde continental pasivo, la costa occidental de África, sin apenas sismicidad, las Islas Hawaii están cercadas por los bordes activos que forman el conocido Cinturón de Fuego del Pacífico, donde se localizan buena parte de los grandes terremotos y las erupciones más explosivas del planeta. Los grandes terremotos producidos con frecuencia en estos bordes activos generan tsunamis devastadores, de los que tenemos reciente memoria y que amenazan también a las Hawaii, a las que han alcanzado en épocas históricas en varias ocasiones.

Por otra parte, el enorme tamaño y la rapidez con que crecen los volcanes recientes en la isla de Hawaii, como el Mauna Loa o el Kilauea, han ocasionado el desgajamiento de los flancos de estos volcanes y su lento desplazamiento hacia el mar (*creeping*), particularmente el flanco sur del Kilauea. La expresión superficial del desplazamiento de este bloque móvil, que alcanza los 6-10 cm/año, es el sistema de fallas de Hilina, con escarpes de hasta 500 m. Es corriente ver fracturas en las carreteras, que tienen que repararse continuamente; en ocasiones se producen desplomes de varios metros en estas fallas, lo que origina terremotos con magnitudes de hasta 8 grados en la escala de Richter, el hundimiento de la costa y la generación de tsunamis que en ocasiones destruyeron parcialmente la capital, Hilo (Fig. 12). En comparación, la sismicidad en Canarias no ha superado los 5.5 grados, al menos en el periodo de registro, y puede que nunca se supere este valor, habida cuenta del ámbito geodinámico del Archipiélago. Además, la isla de Hawaii está prácticamente en actividad eruptiva continua, particularmente en el volcán Kilauea. Un centro eruptivo en este volcán, el PuuOo, se mantiene en erupción desde 1983 y es ya un recurso turístico importante de la isla. Podemos preguntarnos qué sucedería en Canarias si se dieran circunstancias parecidas.

Hay sin duda una sobrevaloración de los riesgos sísmico y volcánico en el Archipiélago, infundada y dañina para la calidad de vida de la población y peligrosa para el sostenimiento del turismo. Se ha llegado a afirmar por algunos la capacidad de predecir terremotos y erupciones, a veces llegando a poner fecha a estos eventos. Estas afirmaciones serían irrelevantes si no fuera por el daño que suponen para una prevención seria del riesgo y para la credibilidad de la ciencia. Los terremotos no pueden predecirse y, desgraciadamente, puede que nunca se logre avisar con tiempo para evitar los cientos de miles de víctimas que producen a lo largo de los años. Los sistemas autocriticamente organizados, definidos por los geofísicos Per Bak, Chao Tang y Kurt Wiesenfeld, del Brookhaven National Laboratory de Nueva York, y publicado en 1987 en *Physical Review Letters*<sup>64</sup>, suponen un concepto revolucionario que se ha aplicado en geofísica, cosmología, evolución y ecología, economía, sociología, física de plasma, neurobiología, etc., y, según los propios autores "sirve tanto para determinar el flujo del Nilo como la luminosidad de las estrellas". Estos sistemas autocriticamente organizados se caracterizan por evolucionar espontáneamente hacia estados críticos sin intervención de agente exter-

---

<sup>64</sup> Bak, P., Tang, C. and Wiesenfeld, K. 1987. Self-organized criticality: an explanation of 1/f noise. *Physical Review Letters* 59: 381-384.



**Fig. 12.-** Sismicidad en Tenerife y Hawaii en el periodo 1960-2012. Aunque Tenerife y Hawaii son islas construidas sobre corteza oceánica lejos de los bordes de placa, el mayor volumen y el considerablemente superior vigor del punto caliente de Hawaii hace que la sismicidad en Tenerife sea comparativamente poco significativa. La zona de mayor sismicidad se localiza desde 1989 en una zona intermedia entre Tenerife y Gran Canaria, donde se encuentra un volcán submarino posiblemente activo. Para algunos la fuente de esta sismicidad sería una falla activa, aunque la disposición gaussiana de los epicentros y su elevada profundidad parecen más propias de actividad magmática subcortical. El riesgo sísmico en Tenerife es muy reducido, como puede apreciarse comparándolo con la sismicidad de Hawaii, con un número mucho mayor de eventos, entre ellos varios con magnitudes superiores a M7.

no alguno, bastando pequeñas perturbaciones imperceptibles e indetectables para romper el equilibrio catastróficamente. El ejemplo más típico es el del montón de arena creciendo grano a grano, que finalmente se derrumba por la adición de un sólo minúsculo grano. Una de las aplicaciones más interesantes que Bak y Tang encontraron y publicaron un año después en el *Journal of Geophysical Research*<sup>65</sup> fue precisamente la demostración de la imposibilidad de predecir los terremotos; éstos son impredecibles porque su evolución depende crucialmente de detalles mínimos de la corteza indetectables instrumentalmente.

Tampoco pueden predecirse las erupciones, aunque sí detectarse, en algunos casos, con cierta antelación. Este hecho está muy bien ilustrado en la erupción submarina de 2011 en El Hierro<sup>66</sup>. Después de meses de frecuentes terremotos y elevación de la isla en varios centímetros por el empuje ascendente del magma, indicios precursores de una posible erupción, ésta sucedió de forma repentina por la ascensión del magma en pocas horas a través de una fractura de la dorsal sur de la isla. Sin embargo, una vez terminada la erupción volvieron a repetirse, incluso con mayor intensidad, terremotos y una elevación de la isla de hasta 20 centímetros, claros indicios de que el magma seguía intentando abrirse

<sup>65</sup> Bak, P and Tang, C., 1989. Earthquakes as a self-organized critical phenomenon. *Journal of Geophysical Research Solid Earth* 94: 15635-15637.

<sup>66</sup> Carracedo, J.C., Troll, V.R., Zaczek, K., Rodríguez-González, A., Soler, V. and Deegan, M. F., 2015. The 2011-2012 submarine eruption off El Hierro, Canary Islands: New lessons in oceanic island growth and volcanic crisis management. *Earth-Science Reviews* 150: 168-200.

paso a través de la corteza, pero sin que se produjera un nuevo evento eruptivo. Por lo tanto, incluso aunque la erupción parezca inminente por indicación de los precursores sísmicos y de deformación, nunca se puede afirmar que el proceso eruptivo vaya a ocurrir, y menos ponerle una fecha.

De todas maneras parece que sí ha habido una persona que podía predecir incluso el día en que una erupción iba a tener lugar. Me lo contó el profesor Robert Tilling, del U.S. Geological Survey, anteriormente director del Hawaiian Volcano Observatory. El Hotel Hawaii Volcano House está situado justo en el borde de la caldera del Kilauea, frente al cráter Halemaumau. Cuando el Kilauea estaba en erupción arrojando columnas de lava a centenares de metros de altura el espectáculo desde el restaurante del hotel era impresionante. Sin embargo, había periodos de calma sin erupciones, y los clientes, decepcionados, siempre preguntaban a Harry, el barman del restaurante ¿Harry, cuándo habrá una erupción?, a lo que Harry siempre contestaba “Mañana, habrá una erupción mañana”.

### BIBLIOGRAFÍA GEOLÓGICA SOBRE EL ÁMBITO DE LAS ISLAS CANARIAS (1981-2016)

- Ablay, G.J. and Martí, J. (2000) Structure, stratigraphy and volcanic evolution of the Pico Teide-Pico Viejo formation, Tenerife, Canary Islands. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 103, 175-208.
- Ablay, G.J., Ernst, G.G.J., Martí, J. and Sparks, R.S.J. (1995) The 2 Ka subplinian eruption of Montaña Blanca, Tenerife. *Bulletin of Volcanology*, 57, (5): 337-355.
- Ablay, G.J., Carroll, M.R., Palmer, M.R., Martí, J. and Sparks, R.S.J. (1998) Basanite-phonolite lineages of the Teide Pico Viejo volcanic complex, Tenerife, Canary Islands. *Journal of Petrology*, 39(5), 905-936.
- Albert-Beltrán J.F., Araña V., Díez J.L. and Valentín, A. (1990) Physical-chemical conditions of the Teide Volcanic System (Tenerife, Canary Islands). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 43, 321-332.
- Allibon, J., Bussy, F., Lewin, É. and Darbellay, B. (2011) The tectonically controlled emplacement of a vertically sheeted gabbro-pyroxenite intrusion: Feeder-zone of an ocean-island volcano (Fuerteventura, Canary Islands). *Tectonophysics*, 500, 78-97.
- Alonso, J.J., Araña, V. and Martí, J. (1988) La ignimbrita de Arico (Tenerife). Mecanismos de emisión y de desplazamiento. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 1(1-2), 15-24.
- Ancochea, E., Fúster, J.M., Ibarrola, E., Cendrero, A., Coello, J., Hernán, F., Cantagrel, J.M. and Jamond, C. (1990) Volcanic evolution of the island of Tenerife (Canary Islands) in the light of new K-Ar data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 44, 231- 249.
- Ancochea, E., Hernán, F., Cendrero, A., Cantagrel, J.M., Fúster, J.M., Ibarrola, E., Coello, J., (1994) Constructive and destructive episodes in the building of a young oceanic island, La Palma, Canary Islands, and genesis of the Caldera de Taburiente. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 60, 243-262.

- Ancochea, E., Brandle, J.L., Cubas, C.R., Hernán, F. and Huertas, M.J. (1996) Volcanic complexes in the eastern ridge of the Canary Islands: the Miocene activity of the island of Fuerteventura. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 70, 183-204.
- Ancochea, E., Huertas, M., 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 Las Cañadas Caldera (Tenerife, Canary Islands). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 88 (3), 177-199.
- Ancochea, E., Brandle, J.L., Huertas, M.J., Cubas, C.R. and Hernán, F. (2003) The felsic dikes of La Gomera (Canary Islands): identification of cone sheet and radial dike swarms. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 120, 197-206.
- Ancochea, E., Hernán, F., Huertas, M.J., Brandle, J.L. and Herrera, R. (2006) A new chronostratigraphical and evolutionary model for La Gomera: Implications for the overall evolution of the Canarian Archipelago. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 157 (4), 271-293.
- Ancochea, E., Brandle, J.L., Huertas, M.J., Hernán, F. and Herrera, R. (2008) Dike swarms, key to the reconstruction of major volcanic edifices: The basic dikes of La Gomera (Canary Islands). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 173, 207-216.
- Anguita, F. and Hernán, F. (2000) The Canary Islands origin: a unifying model. *Journal for Volcanology and Geothermal Research*, 103, 1-26.
- Aparicio, A., Araña, V. and Díez-Gil, J.L. (1994) Una erupción hidromagmática en la isla de Lanzarote: La caldera de El Cuchillo. In: García, A. and Felpeto, A. (eds.) *In memoriam Dr. José Luis Díez Gil*. Serie Casa de Los Volcanes, Cabildo Insular de Lanzarote, pp. 109-120.
- Aparicio, A., Bustillo, M.A., García, R. and Araña, V. (2006) Metasedimentary xenoliths in the lavas of the Timanfaya eruption (1730-1736, Lanzarote, Canary Islands): metamorphism and contamination processes. *Geological Magazine*, 143, 181-193.
- Aparicio, A., Tassinari, C.C.G., García, R. and Araña, V. (2010) Sr and Nd isotope composition of the metamorphic sedimentary and ultramafic xenoliths of Lanzarote (Canary Islands): Implications for magma sources. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 189, 143-150.
- Arnaud, N., Huertas, M.J., Cantagrel, J.M., Ancochea, E. and Fúster, J.M. (2001) Edades  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  de los depósitos de Roques de García (Las Cañadas, Tenerife). *Ceogaceta*, 29, 79-22.
- Balcells, R., Barrera, J.L. and Gómez, J. A. (1992) Geological Map 21-21/21-22 Isla de Gran Canaria.
- Bethencourt-Massieu, A. (1982) Los terremotos de 1793 en El Hierro. *Homenaje a Alfonso Trujillo*, 2, 13-28.
- Brown, R.J., Barry, T.L., Branney, J.J. Pringle, M.S. and Bryan, S.E. (2003) The Quaternary pyroclastic succession of Southeast Tenerife, Canary Islands, explosive eruptions, related caldera subsidence, and sector collapse. *Geological Magazine*, 140, 265-288.

- Brown, R.J., and Branney, M.J. (2004) Event-stratigraphy of a caldera-forming ignimbrite eruption on Tenerife. The 273 ka Poris formation. *Bulletin of Volcanology*, 66, 392-416.
- Bryan, S.E., Martí, J. and Cas, R.A.F. (1998) Stratigraphy of the bandas del Sur formation. An extracaldera record of quaternary phonolitic explosive eruptions from the Las Cañadas edifice, Tenerife (Canary Islands). *Geological Magazine*, 135, 605-636.
- Bryan, S.E., Cas, R.A.F. and Martí, J. (2000) The 0.57 Ma plinian eruption of the Granadilla Member, Tenerife (Canary Islands): an example of complexity in eruption dynamics and evolution. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 103, 209-238.
- Burchardt, S., Troll, V.R., Mathieu, L., Emeleus, H. and Donaldson, C.H. (2013) Ardnamurchan 3D cone-sheet architecture explained by a single elongate magma chamber. *Scientific Reports*, 3, 2891.
- Canales, J.P. and Dañobeitia, J.J. (1998) The Canary Islands swell: a coherence analysis of bathymetry. *Geophysical Journal International*, 132, 479-488.
- Cantagrel, J.M., Cendrero, A., Fúster, J.M., Ibarrola, E. and Jamond, C. (1984) K-Ar chronology of the volcanic eruptions in the Canarian archipelago: Island of La Gomera. *Bulletin of Volcanology*, 47, 597-609
- Carracedo J.C. (1984) Marco Geográfico. En: *Geografía Física de Canarias*. Santa Cruz de Tenerife: Editorial Interinsular Canaria, 1: 10-16.
- Carracedo, J.C. (1994) The Canary Islands: An example of structural control on the growth of large oceanic-island volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 60 (3-4), 225-242.
- Carracedo, J.C. (1996a) Morphological and structural evolution of the western Canary Islands: hotspot-induced three-armed rifts or regional tectonic trends? *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 72, 151-162.
- Carracedo, J.C. (1996b) A simple model for the genesis of large gravitational landslide hazards in the Canary Islands. In: W. McGuire, J. Neuberg and A. Jones (eds.) *Volcano Instability on the Earth and other Planets. Geological Society of London, Special Publications*, 110, 125-135.
- Carracedo, J.C. (1999) Growth, structure, instability and collapse of Canarian volcanoes and comparisons with Hawaiian volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 94, 1-19.
- Carracedo, J.C. (2008a) Outstanding geological values: the basis of Mt Teide's World Heritage nomination. *Geology Today* 24(3), 104-111.
- Carracedo, J.C., (2008b). Canarian Volcanoes IV: La Palma, La Gomera y El Hierro. Rueda, Madrid, 213 pp.
- Carracedo, J.C. (2011) *Geología de Canarias I: Origen, evolución, edad y volcanismo*. Madrid: Editorial Rueda, pp. 398.
- Carracedo, J.C. and Rodríguez Badiola, E. (1991) Lanzarote. La erupción volcánica de 1730: estudio volcanológico de una de las erupciones basálticas fisurales de mayor duración y magnitud de la historia. El Museo Canario, Las Palmas de Gran Canaria, Cabildo Insular de Lanzarote, Arrecife de Lanzarote, p.183.

- Carracedo, J.C. and Rodríguez Badiola, E. (1993) Evolución geológica y magmática de la isla de Lanzarote, Islas Canarias. *Revista Academia Canaria Ciencias*, 4, 25-58.
- Carracedo, J.C. and Day, S.J. (2002). *Canary Islands*. Series Classic Geology in Europe, 4. Harpenden (UK): Terra Publishing, pp. 249.
- Carracedo, J.C. and Troll, V.R. (2013). Teide volcano – Geology and eruptions of a highly differentiated oceanic stratovolcano. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, p. 234.
- Carracedo, J.C., Rodríguez Badiola, E. and Soler, V. (1990) Aspectos geológicos y estructurales, evolución petrológica e implicaciones en riesgo volcánico de la erupción de 1730 en Lanzarote, Islas Canarias. *Estudios Geológicos*, 46, 25-55.
- Carracedo, J.C., Rodríguez Badiola, E.R. and Soler, V. (1992) The 1730-1736 eruption of Lanzarote: an unusually long, high magnitude fissural basaltic eruption in the recent volcanism of the Canary Islands. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 53, 239-250.
- Carracedo, J.C., Day, S., Guillou, H. and Rodríguez Badiola, E. (1996). The 1677 eruption of La Palma, Canary Islands. *Estudios Geológicos*, 52, 345-357
- Carracedo, J.C., Day, S.J., Guillou, H., Rodríguez Badiola, E., Canas, J.A. and Pérez Torrado, F.J. (1998) Hotspot volcanism close to a passive continental margin: the Canary Islands. *Geological Magazine*, 135(5), 591-604.
- Carracedo, J.C., Day, S.J., Guillou, H. and Gravestock, P. (1999) Later stages of volcanic evolution of La Palma, Canary Islands: Rift evolution, giant landslides, and the genesis of the Caldera de Taburiente. *Geological Society of America Bulletin*, 111, 755-768.
- Carracedo, J.C., Rodríguez Badiola, E., Guillou, H., De La Nuez, J. and Pérez Torrado, F.J. (2001) Geology and volcanology of La Palma and El Hierro, Western Canaries. Volumen Especial de *Estudios Geológicos*, 57: 124 pp.
- Carracedo, J.C., Pérez-Torrado, F.J., Ancochea, E., Meco, J., Hernán, F., Cubas, C.R., Casillas, R., Rodríguez Badiola, E. and Ahijado, A. (2002). Cenozoic volcanism II: The Canary Islands. In: Gibbons, W. and Moreno, T. (eds) *The Geology of Spain*. The Geological Society of London, pp. 439-472.
- Carracedo J.C., Singer, B., Jicha, B., Guillou, H., Rodríguez Badiola, E., Meco, J., Pérez Torrado, F.J., Gimeno, D., Socorro, S. and Láinez, A. (2003) La erupción y el tubo volcánico del volcán Corona (Lanzarote, Islas Canarias). *Estudios Geológicos*, 59, 277-302.
- Carracedo, J.C., Guillou, H., Paterne, M.; Scaillet, S.; Rodríguez Badiola, E., Paris, R., Pérez Torrado, F.J. and Hansen Machín, A. (2004a) Análisis del riesgo volcánico asociado al flujo de lavas en Tenerife (Islas Canarias): escenarios previsibles para una futura erupción en la isla. *Estudios Geológicos*, 60, 63-93.
- Carracedo, J.C., Pestano Pérez, G., García Martínez, A., Rodríguez Valdés, E., Cabrera Peraza, J.M., Bermejo Domínguez, J.A., Hansen Machín, A., Pérez Torrado, F.J., Paris, R., Rodríguez Badiola, E., Scaillet, S. and Paterne, M. (2004b) *Avance de un mapa de peligrosidad volcánica de Tenerife (escenarios previsibles para una futura erupción en la isla)*. Ahorros de Canarias: Servicio Publicaciones de la Caja Gral., p. 47.

- Carracedo, J.C., Rodríguez Badiola, E., Pérez Torrado, F.J., Hansen, A., Rodríguez-González, A., Scaillet, S., Guillou, H., Paterne, M., Fra-Paleo, U. and Paris, R. (2007a) La erupción que Cristóbal Colón vió en la isla de Tenerife (Islas Canarias). *Geogaceta*, 41, 39-42.
- Carracedo, J.C., Rodríguez Badiola, E., Guillou, H., Paterne, M., Scaillet, S., Pérez Torrado, F.J., Paris, R., Fra-Paleo, U. and Hansen, A. (2007b) Eruptive and structural history of Teide volcano and rift zones of Tenerife, Canary Islands. *Geological society of America Bulletin*, 19, 1027-1051.
- Carracedo, J.C., Fernández-Turiel, Gimeno, D., Guillou, H., Klügel, A., Krastel, S., Paris, R., Perez-Torrado, F.J., Rodríguez-Badiola, E., Rodríguez-Gonzalez, A., Troll, V.R., Walter, T.R., Wiesmaier, S. (2011a) Comment on "The distribution of basaltic volcanism on Tenerife, Canary Islands: Implications on the origin and dynamics of the rift systems" by A. Geyer and J. Martí (2010). *Tectonophysics* 483: 310-326. *Tectonophysics*, 503(3-4), 239-241.
- Carracedo, J.C., Guillou, H., Nomade, S., Rodríguez-Badiola, E., Pérez-Torrado, F.J., Rodríguez-González, A., Paris, R., Troll, V.R., Wiesmaier, S., Delcamp, A. and Fernández-Turiel, J.L. (2011b) Evolution of ocean-island rifts: The northeast rift zone of Tenerife, Canary Islands. *Geological Society of America Bulletin*, 123, 562-584.
- Carracedo, J.C., Pérez-Torrado, F.-J., Rodríguez-González, A., Fernandez-Turiel, J.-L., Klügel, A., Troll, V.R. and Wiesmaier, S. (2012a) The ongoing volcanic eruption of El Hierro, Canary Islands. *EOS Transitions, American Geophysical Union*, 93(9), 89-90.
- Carracedo, J.C., Pérez Torrado, F., Rodríguez-González, Soler, V., Fernández Turiel, J.L., Troll, V.R. and Wiesmaier, S. (2012b) The 2011 submarine volcanic eruption in El Hierro (Canary Islands). *Geology Today*, 28(2), 53-58.
- Carracedo, J.C., Troll, V.R., Zaczek, K., Rodríguez-González, A., Soler, V. and Deegan, F.M. (2015a) The 2011/2012 submarine eruption off El Hierro, Canary Islands: New lessons in oceanic island growth and volcanic crisis management. *Earth-Science Reviews* 150, 168-200.
- Carracedo, J.C., Perez-Torrado, F.J., Rodríguez-González, A., Paris, R., Troll, V.R. and Barker, A.K. (2015b) Volcanic and structural evolution of Pico do Fogo, Cape Verde. *Geology Today*, 31(4), 146-152.
- Carracedo, J.C. and Troll, V.R. (2016) *Geology of the Canary Islands*. Elsevier. 458 pp.
- Clarke, S.C.L. and Spera, F.J. (1990) Evolution of the Miocene Tejeda magmatic system, Gran Canaria, Canary Islands. *Contribution Mineralogy and Petrology*, 104, 681-699.
- Clarke, H., Troll, V.R., Carracedo, J.C., Byrne, K., and Gould, R. (2005) Changing eruptive styles and textural features from phreatomagmatic to strombolian activity of basaltic littoral cones: Los Erales cinder cone, Tenerife, Canary Islands. *Estudios Geológicos*, 61(3-6), 121-134.
- Clarke, H., Troll, V.R. and Carracedo, J.C. (2009) Phreatomagmatic to Strombolian eruptive activity of basaltic cinder cones: Montana Los Erales, Tenerife, Canary Islands. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 180, 225-245.
- Coello, J. (1987) Las aguas subterráneas en las formaciones volcánicas del Norte de La Palma (Islas Canarias). Com. Simp. Int. Rec. Hidraulica. Canarias Agua 2000, p. 19.

- Coello, J., Cantagrel, J.M., Hernán, F., Fúster, J.M., Ibarrola, E., Anocha, E., Casquet, C., Jamon, C., Díaz de Téran, J.R. and Cendrero, A. (1992) Evolution of the eastern volcanic ridge of the Canary Islands based on new K-Ar data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 53, 251-274.
- Coello, J., Cantagrel, J.M., Hernán, F., Fúster, J.M., Ibarrola, E., Anocha, E., Casquet, C., Jamon, C., Díaz de Téran, J.R. and Cendrero, A. (1992) Evolution of the eastern volcanic ridge of the Canary Islands based on new K-Ar data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 53: 251-274.
- Collier, J.S. and Watts, A.B. (2001) Lithospheric response to volcanic loading by the Canary Islands: constraints from seismic reflection data in their flexural moat. *Geophysical Journal International*, 147, 660-676.
- Coppo, N., Schnegg, P.A., Falco, P., Costa, R. and Burkhard, M. (2008) Structural pattern of the Western Las Cañadas caldera (Tenerife, Canary Islands) revealed by audiomagnetotellurics. *Swiss Journal of Geosciences*, 101, 409-413.
- Cousens, B.L., Spera, F.J. and Tilton, G.R. (1990) Isotopic patterns in silicic ignimbrites and lava flows of the Mogán and lower Fataga Formations, Gran Canaria, Canary Islands: temporal changes in mantle source composition. *Earth Planetary Science Letters*, 96, 319-335.
- Criado, C. and Dorta, P. (2003) An unusual 'blood rain' over the Canary Islands (Spain). The storm of January 1999. *Journal of Arid Environments*, 55, 765-783.
- Crisp, J.A. and Spera, F.J. (1987) Pyroclastic flows and lavas of the Mogán and Fataga formations, Tejada volcano, Gran Canaria, Canary Islands: Mineral chemistry, intensive parameters, and magma chamber evolution. *Contribution Mineralogy and Petrology* 96: 503-518.
- Cubas, C.R., Anocha, E., Hernán, F., Huertas, M.J. and Brändle, J.L. (2002) Edad de los domos sálicos de la isla de La Gomera. *Geokjkgaceta* 32, 71-74.
- Davidson, I. (2005). Central Atlantic margin basins of North West Africa: Geology and hydrocarbon potential (Morocco to Guinea). *Journal of African Earth Sciences*, 43, 254-274.
- 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, p. 170.
- Dávila-Harris, P., Branney M.J. and Storey, M. (2011). Large eruption-triggered ocean-island landslide at Tenerife: Onshore record and long-term effects on hazardous pyroclastic dispersal. *Geology*, 39-10, 951-954.
- Day, S.J., Carracedo, J.C. and Guillou, H. (1997) Age and geometry of an aborted rift collapse: the San Andres fault system, El Hierro, Canary Islands. *Geological Magazine*, 134, 523-537.
- Day, S.J., Carracedo, J.C., Guillou, H. and Gravestock, P. (1999) Recent structural evolution of the Cumbre Vieja volcano, La Palma, Canary Islands: volcanic rift zone reconfiguration as a precursor to volcanic flank instability? *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 94, 135-167.

- Deegan F.M., Troll V.R., Barker A.K., Harris C., Chadwick J.P., Carracedo J.C. and Delcamp A. (2012) Crustal versus source processes recorded in dykes from the Northeast volcanic rift zone of Tenerife, Canary Islands. *Chemical Geology*, 334, 324-344.
- De la Nuez, J., Quesada, M.L. and Alonso, J.J. (1997) *Los volcanes de los islotes al norte de Lanzarote*. Fundación César Manrique. 233 pp.
- Delcamp A., Petronis M., Troll V.R., van Wyk de Vries B., Carracedo J.C. and Pérez-Torrado F.J. (2010) Paleomagnetic evidence for rotation of the NE-rift on Tenerife, Canary Islands. *Tectonophysics*, 492, 40-59.
- Delcamp, A., Troll, V.R., van Wyk de Vries, B., Carracedo, J.C., Petronis, M.S., Pérez-Torrado, F.J. and Deegan, F.M. (2012) Dykes and structures of the NE rift of Tenerife, Canary Islands: a record of stabilization and destabilization of ocean island rift zones. *Bulletin of Volcanology*, 74(5), 963-980.
- Delcamp A., Petronis M. and Troll V.R. (2014) Discerning magmatic flow patterns in shallow-level basaltic dykes from the NE rift zone of Tenerife, Spain, using the Anisotropy of Magnetic Susceptibility (AMS) technique. In: Ort, M.H., Porreca, M. and Geissmann, J.W. (eds.) *The Use of Palaeomagnetism and Rock Magnetism to Understand Volcanic Processes*. Geological Society of London, Special Publications 396, pp.87-106.
- Demény, A., Ahijado, A., Casillas, R. and Vennemann, T.W. (1998) Crustal contamination and fluid/rock interaction in the carbonatites of Fuerteventura (Canary Islands, Spain): a C, O, H isotope study. *Lithos*, 44, 101-115.
- Donoghue, E., Troll, V.R., Harris, C., O'Halloran, A., Perez-Torodo, J.F. and Walter, T.R. (2008) Low-temperature hydrothermal alteration of intra-caldera tuffs, Tejeda caldera, Gran Canaria: mineralogical and isotopic changes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176, 551-564.
- Donoghue, E., Troll, V.R. and Harris, C. (2010) Hydrothermal alteration of the Miocene Tejeda Intrusive Complex, Gran Canaria, Canary Islands: insights from petrography, mineralogy and O- and H- isotope geochemistry. *Journal of Petrology*, 51, 2149-2176.
- Edgar, C.J. (2003) The stratigraphy and eruption dynamics of a Quaternary phonolitic plinian eruption sequence. The Diego Hernandez Formation, Tenerife, Canary Islands (Spain). PhD Thesis, Monash University, Clayton, p. 264.
- Edgar, C.J., Wolff, J.A., Nichols, H.J., Cas, R.A.F. and Martí, J. (2002). A complex Quaternary ignimbrite-forming phonolitic eruption: the Poris Member of the Diego Hernández Formation (Tenerife, Canary Islands). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 118, 99-130.
- Edgar, C.J., Wolff, J.A., Olin, P.H., Nichols, H.J., Pittari, A., Cas, R.A.F., Reiners, P.W., Spell, T.L. and Martí, J. (2007). The late Quaternary Diego Hernández Formation, Tenerife: Volcanology of a complex cycle of voluminous explosive phonolitic eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 160, 59-85.
- Fernández Palacios, J.M., Nascimento, L., Otto, R., Delgado, J.D., Garcia-del-Rey, E., Arevalo, J.R. and Whittaker, R.J. (2010). A reconstruction of Palaeo-Macaronesia, with particular reference to the long-term bio-geography of the Atlantic island laurel forests. *Journal of Biogeography*, 38, 226-246.

- Fernández, C., Casillas, R., Ahijado, A., Perello, V. and Hernández-Pacheco, A. (1997) Shear zones as a result of intraplate tectonics in oceanic crust: The example of the Basal Complex of Fuerteventure (Canary Islands). *Journal of Structural Geology*, 19(1), 41-57.
- Freundt, A. and Schmincke, H.-U. (1992) Mixing of rhyolite, trachyte and basalt magma erupted from a vertically and laterally zoned reservoir, composite flow P1, Gran Canaria. *Contribution Mineralogy and Petrology*, 112, 1-19.
- Freundt, A. and Schmincke, H.-U. (1995) Petrogenesis of rhyolite-trachyte-basalt composite ignimbrite P1, Gran Canaria, Canary Islands. *Journal of Geophysical Research*, 100, 455-474.
- Freundt, A. and Schmincke, H.-U. (1998) Emplacement of ash-layers related to high-grade ignimbrite P1 in the sea around Gran Canaria. In: Weaver, P.P.E., Schmincke, H.-U., Firth, J.V., Duffield, W.A. (eds) Proc. ODP Sci. Res. 157: 201-218.
- Frizon de Lamotte, D., Saint Bezar, B., Bracene, R. and Mercier, E. (2000) The two main steps of the Atlas building and geodynamics of the western Mediterranean. *Tectonics* 19(4), 740-61.
- Funk, T. and Schmincke, H.-J. (1998) Growth and destruction of Gran Canaria deduced from seismic reflection and bathymetric data. *Journal of Geophysical Research*, 103(B7), 15393-15407.
- 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 Real Sociedad Española de Historia Natural (Section Geología)*, 89, 25-41.
- Gabaldón, V., Cabrera, M.C. and Cueto, L.A. (1989) Formación detrítica de Las Palmas. Sus facies y evolución sedimentológica. ESF Meeting on Canarian Volcanism, Lanzarote, 210-215.
- Galipp, K., Klügel, A. and Hansteen, T.H. (2006) Changing depths of magma fractionation and stagnation during the evolution of an oceanic island volcano: La Palma (Canary Islands). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 155, 285-306.
- García Cacho, L., Díez-Gil, J.L. and Araña, V. (1994) A large volcanic debris avalanche in the Pliocene Roque Nublo Stratovolcano, Gran Canaria, Canary Islands. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 63, 217-229.
- García-Talavera, F. (1990). Aves gigantes en el Mioceno de Famara. *Revista de la Academia Canaria de Ciencias*, 2, 71-79.
- Gee, M.J.R., Masson, D.G., Watts, A.B. and Mitchell, N.C. (2001) Offshore continuation of volcanic rift zones, El Hierro, Canary Islands. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 105, 107-119.
- Gee, M.J.R., Watts, A.B., Masson, D.G., and Mitchell, N.C. (2001) Landslides and the evolution of El Hierro in the Canary Islands. *Marine Geology*, 177: 271-293.
- Gee, J., Staudigel, H., Tuxe, L. and Pick, T. (1993) Magnetization of the La Palma Seamount Series: Implications for seamount paleopoles. *Journal of Geophysical Research*, 98,-B7: 11,743-11,767.

- Geldmacher, J., Hoernle, K., Van den Bogaard, P., Zankl, G. and Garbe-Schönberg, D. (2001) Earlier history of the C70-Ma-old Canary hotspot based on the temporal and geochemical evolution of the Selvagen archipelago and neighbouring seamounts in the east-ern north Atlantic. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 111, 55-87
- Geldmacher J, Hoernle K, Van den Bogaard P, Duggen S, Werner R (2005) New Ar-40/Ar-39 age and geochemical data from seamounts in the Canary and Madeira volcanic provinces: support for the mantle plume hypothesis. *Earth Planet Sc Lett* 237: 85-101.
- Geyer, A. and Marti, J. (2011) The distribution of basaltic volcanism on Tenerife, Canary Islands: Implications on the origin and dynamics of the rift system, *Tectonophysics*, 483: 310-326.
- Geyer, A. and Martí, J. (2011) The distribution of basaltic volcanism on Tenerife, Canary Islands: Implications on the origin and dynamics of the rift system, reply to the comment by Carracedo et al. *Tectonophysics*, 503(33-4), 234-238.
- Giachetti, T., Paris, R., Kelfoun, K., Pérez-Torrado, F. J. (2011) Numerical modelling of the tsunami triggered by the Güümar debris avalanche, Tenerife (Canary Islands): Comparison with field-based data. *Marine Geology* 284(1-4): 189-202.
- González, P.J., Samsonov, S.V., Pepe, S., Tiampo, K.F., Tizzani, P., Casu, F., Fernández, J., Camacho, A. and Sansosti, E. (2013) Magma storage and migration associated with the 2011-2012 El Hierro eruption: Implications for crustal magmatic systems at oceanic island volcanoes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 118(8), 4361-4377.
- Gudmundsson, A. (1990) Emplacement of dikes, sills and crustal magma chambers at divergent plate boundaries. *Tectonophysics*, 176, 257-275.
- Guillou, H., Carracedo, J.C., Torrado, F.P. and Badiola, E.R. (1996) K-Ar ages and magnetic stratigraphy of a hotspot-induced, fast grown oceanic island: El Hierro, Canary Islands. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 73, 141-155.
- Guillou, H., Carracedo, J.C. and Day, S.J. (1998) Dating the Upper Pleistocene-Holocene volcanic activity of La Palma using the unspiked K-Ar technique. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 86, 137-149.
- Guillou H., Carracedo, J.C. and Duncan, R. (2001) K-Ar, <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar Ages and magnetostratigraphy of Brunhes and Matuyama lava sequences from La Palma Island. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 106, 175-194.
- Guillou, H., Carracedo, J.C., Paris, R. and Pérez-Torrado, F.J. (2004a) Implications for the early shield-stage evolution of Tenerife from K/Ar ages and magnetic stratigraphy. *Earth and Planetary Science Letters*, 222, 599-614.
- Guillou, H., Pérez Torrado, F.J., Hansen Machin, A.R., Carracedo, J.C.C. and Gimeno, D. (2004b) The Plio-Quaternary volcanic evolution of Gran Canaria based on new K—Ar ages and magnetostratigraphy. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 135(3), 221-246.
- Gurenko, A.A., Chaussidon, M. and Schmincke, H.-U. (2001) Magma ascent and contamination beneath one intraplate volcano: evidence from S and O isotopes in glass

- inclusions and their host clinopyroxenes form Miocene shield basaltic hyaloclastites southwest of Gran Canaria (Canary Islands). *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 65(23), 4359-4374.
- Gurenko, A.A., Sobolev, A.V., Hoernle, K.A., Hauff, F. and Schmincke, H.-U. (2009) Enriched, HIMU-type peridotite and depleted recycled pyroxenite in the Canary plume: A mixed-up mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 277(3-4), 514-524.
- Gurenko, A.A., Hoernle, K.A., Sobolev, A.V., Hauff, F. and Schmincke, H.-U. (2010) Source components of the Gran Canaria (Canary Islands) shield stage magmas: evidence from olivine composition and Sr-Nd-Pb isotopes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 159, 689-702.
- Gutiérrez, M., Casillas, R., Fernandez, C., Balogh, K., Ahijado, A., Castillo, C., Comenero, J.R. and Garcia-Navarro, E. (2006) The submarine volcanic succession of the basal complex of Fuerteventura, Canary Islands: A model of submarine growth and emergence of tectonic volcanic islands. *Geological Society of America Bulletin*, 118, 785-804.
- Hansen, A., (1993) Bandama: paisaje y evolución. Las Palmas de Gran Canaria: Cabildo Insular, 127 pp.
- Hansen, A.M., Rodríguez-González, A. and Pérez-Torrado, F.J. (2008). Vulcanismo Holoceno: Bandama y su entorno. In: Pérez-Torrado, F.J. and Cabrera, M.C. (eds) *Itinerarios geológicos por las Islas Canarias. Gran Canaria*. Sociedad Geológica de España, Vol. Geo-Guías, 5: 89-103.
- Hansteen, T.H., Klügel, A. and Schmincke, H.-U. (1998) Multi-stage magma ascent beneath the Canary Islands: evidence from fluid inclusions. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 132(1), 48-64.
- Hansteen, T.H. and Troll, V.R. (2003) Oxygen isotope composition of xenoliths from the oceanic crust and volcanic edifice beneath Gran Canaria (Canary Islands): consequences for crustal contamination of ascending magmas. *Chemical Geology*, 193, 181-193.
- Hernán Reguera, F., Cubas, C.R., Huertas, M.J., Brändle, J.L. and Ancochea, E. (2000). Geometría del enjambre de diques cónicos de Vallehermoso, La Gomera (Islas Canarias). *Geogaceta*, 27:
- Hernández-Pacheco, A. (1982). Sobre una posible erupción en 1973 en la isla de El Hierro (Canarias). *Estudios Geológicos*, 38, 15-25.
- Hernández-Pacheco, A. and Valls, C. (1982) The historic eruptions of La Palma island (Canaries). *Revista Universidad dos Acores*, 3, 83-94.
- Herrera, R., Huertas, M.J. and Ancochea, E. (2008) Edades  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  del Complejo Basal de la isla de La Gomera ( $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  ages of the Basal Complex of La Gomera Island). *Geogaceta*, 44, 7-10.
- Hobson, A., Bussy, F. and Hernandez, J. (1998) Shallow-level migmatization of gabbros in a metamorphic contact aureole, Fuerteventura Basal Complex, Canary Islands. *Journal of Petrology*, 39, 1025-1037.
- Hoernle, K. (1998) Geochemistry of Jurassic ocean crust beneath Gran Canaria, Canary Islands: implication for crustal recycling and assimilation. *Journal of Petrology*, 39, 859-880.

- Hoernle, K and Schmincke, H.U. (1993) The Role of Partial Melting in the 15-Ma Geochemical Evolution of Gran Canaria: A Blob Model for the Canary Hotspot. *Journal of Petrology*, 34, Part 3: 599-626.
- Holik, J.S., Rabinowitz, P.D. and Austin, J.A. (1991) Effects of Canary hotspot volcanism on structure of oceanic-crust off Morocco. *Journal of Geophysical Research – Solid Earth and Planets*, 96(B7), 12039-12067.
- Holloway, M.I. and Bussy, F. (2007) Trace element distribution among rock-forming minerals from metamorphosed to partially molten basic igneous rocks in a contact aureole (Fuerteventura, Canaries). *Lithos*, 102, 616-639.
- Holloway, M.I., Bussy, F. and Vennemann, T.W. (2008) Low-pressure, water-assisted anatexis of basic dykes in a contact metamorphic aureole, Fuerteventura (Canary Islands): oxygen isotope evidence for a meteoric fluid origin. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 155, 111-121.
- Huertas, M.J., Arnaud, N.O., Ancochea, E., Cantagrel, J.M., Fúster, J.M. (2002) Ar-40/Ar-39 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, (3-4): 351-365.
- Hunt, J.E., Wynn, R.B., Talling, P.J., and Masson, D.G. (2013). Multistage collapse of eight western Canary Island landslides in the last 1.5 Ma: Sedimentological and geochemical evidence from subunits in submarine flow deposits. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14 (7), 2159-2181.
- IGME (Instituto Geológico and Minero de España) (1992): Proyecto MAGNA. Memoria y mapa geológico de España a escala 1:100.000. Hoja nº 21-21/21-22. Isla de Gran Canaria. IGME, Madrid.
- Izquierdo, T. (2014) Conceptual hydrogeological model and aquifer system classification of a small volcanic island (La Gomera; Canary Islands). *CATENA*, 114, 119-128.
- Javoy, M., Stillman, C.J. and Pineau, F. (1986) Oxygen and hydrogen isotope studies on the basal complexes of the Canary Islands: implications on the conditions of their genesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92, 225-235.
- Johansen, T.S., Hauff, F., Hoernle, K., Klügel, A. and Kokfelt, T.F. (2005) Basanite to phonolite differentiation within 1550-1750 yr: U-Th-Ra isotopic evidence from the A.D. 1585 eruption on La Palma, Canary Islands. *Geology*, 33, 897-900.
- Johnson, S.E., Tate, M.C. and Fanning, C.M. (1999) New geological mapping and SHRIMP U-Pb zircon data in the Peninsular Ranges batholith, Baja California, Mexico: Evidence for a suture? *Geology*, 27, 743-746.
- Kissel, C., Guillou, H., Laj, C., Carracedo J.C., Nomade, S., Perez-Torrado, F.J. and Wandres, C. (2011) The Mono Lake excursion recorded in phonolitic lavas from Tenerife (Canary Islands): Paleomagnetic analyses and coupled K/Ar and Ar/Ar dating. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 187(3-4), 232-244.
- Kissel, C., Guillou, H., Laj, C., Carracedo, J.C., Perez-Torrado, F., Wandres, C., and Nomade, S. (2014) A combined paleomagnetic/dating investigation of the upper Jaramillo transition from a volcanic section at Tenerife (Canary Islands). *Earth and Planetary Science Letters*, 406, 59-71.

- Kissel, C., Rodriguez-Gonzalez, A., Laj, C., Carracedo J.C., Perez-Torrado, F.J., Wandres, C. and Guillou, H. (2015) Paleosecular variation of the earth magnetic field at the Canary Islands over the last 15 ka. *Earth and Planetary Science Letters*, 412, 52-60.
- Klügel, A. (1998) Reactions between mantle xenoliths and host magma beneath La Palma (Canary Islands): constraints on magma ascent rates and crustal reservoirs. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 131, 237-257
- Klügel, A., Schmincke, H.U., White, J.D.L. and Hoernle, K.A. (1999) Chronology and volcanology of the 1949 multi-vent rift-zone eruption on La Palma (Canary Islands). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 94, 267-257.
- Klügel, A., Hoernle, K.A., Schmincke, H.U. and White, J.D.L. (2000) The chemically zoned 1949 eruption on La Palma (Canary Islands): petrologic evolution and magma supply dynamics of a rift-zone eruption. *Journal of Geophysical Research*, 105(B3), 5997-6016.
- Klügel, A., Hansteen, T. H., Galipp, K., (2005) Magma storage and underplating beneath Cumbre Vieja volcano, La Palma (Canary Islands). *Earth and Planetary Science Letters* 236: 211-226.
- Klügel, A., Hansteen, T.H., van den Bogaard, P. Strauss, H., Hauff, F. (2011) Holocene fluid venting at an extinct Cretaceous seamount, Canary archipelago. *Geology* 39: 855-858.
- Kobberger, G. and Schmincke, H.-U. (1999) Deposition of rheomorphic ignimbrite D (Mogán Formation), Gran Canaria, Canary Islands, Spain. *Bulletin of Volcanology*, 60, 465-485.
- Krastel, S. and Schmincke, H.-U. (2002a) Crustal structure of northern Gran Canaria deduces from active seismic tomography. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 115, 153-177.
- Krastel, S. and Schmincke, H.-U. (2002b) The channel between Gran Canaria and Tenerife: constructive processes and destructive events during the evolution of volcanic islands. *International Journal of Earth Sciences*, 91, 629-641.
- Krastel, S., Schmincke, H.-U., Jacobs, C.L., Rihm, R., Le Bas, T.P. and Alibés, B. (2001) Submarine landslides around the Canary Islands. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106(B3), 3977-3997.
- Kröcher, J. and Buchner, E. (2009). Age distribution of cinder cones within the Bandas del Sur Formation, southern Tenerife, Canary Islands. *Geological Magazine*, 146 (2), 161-172.
- Le Bas, M.J., Rex, D.C. and Stillman, C.J. (1986) The early magmatic chronology of Fuerteventura, Canary Islands. *Geological Magazine*, 123, 287-298.
- Leal, M., Lillo, J. and Márquez, Á. (2014) Assessment of groundwater circulation in La Gomera aquifers (Canary Islands, Spain) from their hydrochemical features. *Environmental Earth Sciences*, 71, 23-30.
- Leat, P.T. and Schmincke, H.-U. (1993) Large-scale rheomorphic shear deformation in Miocene peralkaline ignimbrite E, Gran Canaria. *Bulletin of Volcanology*, 55, 155-165.

- Lomoschitz, A. and Corominas, J. (1997) La depression de Tirajana, Gran Canaria. Una macroforma erosiva producida por grandes desilizamientos. *Cuarternario y Geomorfología*, 11(3-4), 75-92.
- Longpré, M.-A., Troll, V.R. and Hansteen, T.H. (2008a) Upper mantle magma storage under a Canarian shield volcano: Teno massif, Tenerife, Spain. *Journal of Geophysical Research*, 113, B08203.
- Longpré, M.-A., del Porto, R., Troll, V.R. and Nicoll, G. (2008b) Engineering geology and future stability of the El Risco landslide, NW-Gran Canaria, Spain. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67, 165-172.
- Longpré, M.-A., Troll, V.R., Walter, T.R. and Hansteen, T.H. (2009) Volcanic and geochemical evolution of the Teno massif, Tenerife, Canary Islands: Some repercussions of giant landslides on ocean island magmatism. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(12): Q12017.
- Longpré, M.A., Chadwick, J.P., Wijbrans, J. and Iping, R., (2011) Age of the El Golfo debris avalanche, El Hierro (Canary Islands): New constraints from laser and furnace  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 203, 76-80.
- López, C., Blanco, M. J., Abella, R., Brenes, B., Cabrera-Rodríguez, V. M., Casas, B., Domínguez-Cerdeña, I., Felpeto, A., Fernández de Villalta, M., del Fresno, C., García, O., (2); García-Arias, M. J., García-Cañada, L., Gomis-Moreno, A., González-Alonso, E., Guzmán -Pérez, J., Iribarren, I., López-Díaz, R., Luengo-Oroz, N., Meletlidis, S., Moreno, M., Moure, D., Pereda de Pablo, J., Rodero, C., Romero, E., Sainz-Maza, S., Sentre-Domingo, M. A., Torres, P. A., Trigo, P. and Villasante-Marcos, M. (2012) Monitoring the volcanic unrest of El Hierro (Canary Islands) before the onset of the 2011-2012 submarine eruption. *Geophysical Research Letters*, 39, L13303.
- Lundstrom, C.C., Hoernle, K. and Gill, J. (2003) U-series disequilibria in volcanic rocks from the Canary Islands: Plume versus lithospheric melting. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67, 4153-4177.
- Luongo, G., Cubellis, R., Obrizzo, R. and Petrazzuoli, S.M. (1991) A physical model for the origin of volcanism of the Tyrrhenian margin: the case of the Neapolitan area. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 48, 173-185.
- Mader, C. (2001) Modeling the La Palma landslide tsunami. *Science of Tsunami Hazards*, 19, 150-170.
- Manconi, A., Longpré, M.-A., Walter, T.R., Troll, V.R. and Hansteen, T.H. (2009) The effects of flank collapses on volcano plumbing systems. *Geology*, 37, 1099-1102.
- Márquez, A., López, I., Herrera, R., Martín-González, F., Izquierdo T. and Carreño, F. (2008) Spreading and potential instability of Teide volcano, Tenerife, Canary Islands. *Geophysical Research Letters*, 35, L05305.
- Martí, J., Mitjavila, J. and Araña, V. (1994) Stratigraphy, structure and geo-chronology of the Las Cafiadas caldera (Tenerife, Canary Islands). *Geological Magazine*, 131, 715-727.
- Martí, J. and Gudmundsson, A. (2000). The Las Cañadas caldera (Tenerife, Ca-nary Islands): an overlapping collapse caldera generated by magma-chamber migration. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 103, 161-173.

- Martí, J., Geyer, A., Andujar, J., Teixidó, F. and Costa, F. (2008) Assessing the potential for future explosive activity from Teide-Pico Viejo stratovolcanoes (Tenerife, Canary Islands). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178, 529-542.
- Martín, J.L. and Díaz, M. (1984) El Tubo volcánico de Los Naturalistas (Lanzarote – Islas Canarias). *Lapiasz*, 13, 51-53.
- Martínez del Olmo, W. and Buitrago, J. (2002). Sedimentación y volcanismo al este de las islas de Fuerteventura y Lanzarote (Surco de Fúster Casas). *Geogaceta*, 32, 51-54.
- Masson, D.G. (1996) Catastrophic collapse of the volcanic island of Hierro 15 ka ago and the history of landslides in the Canary Islands. *Geology*, 24, 231-234.
- Masson, D.G., Watts, A.B., Gee, M.J.R., Urgelés, R., Mitchell, N.C., Le Bas, T.P. and Canals, M. (2002) Slope failures on the flanks of the western Canary Islands. *Earth Science Reviews*, 57, 1-35.
- Mathieu, L., van Wyk de Vries, B., Holohan, E.P., and Troll, V.R. (2008) Dykes, cups, saucers and sills: Analogue experiments on magma intrusion into brittle rocks. *Earth and Planetary Science Letters* 271, 1-13.
- McHone, J.G. (2000) Non-plume magmatism and rifting during the opening of the central Atlantic Ocean. *Tectonophysics*, 316, 287-296.
- Meco, J. and Stearns, C.E. (1981) Emergent littoral deposits in the eastern Canary Islands. *Quaternary Research*, 15(2), 199-208.
- Meco, J., Petit-Maire, N., Guillou, H., Carracedo, J.C., Lomoschitz, A., Ramos, A.J.G. and Ballester, J. (2003) Climatic changes over the last 5,000,000 years as recorded in the Canary Islands. *Episodes* 26, 133-134.
- Meco, J., Scaillet, S., Guillou, H., Lomoschitz, A., Carracedo, J.C., Ballester, J., Betancort, J.F. and Cilleros, A. (2007) Evidence for long-term uplift on the Canary Islands from emergent Mio-Pliocene littoral deposits. *Global and Planetary Change*, 57, 222-234.
- Mehl, K.W. and Schmincke, H.-U. (1999) Structure and emplacement of the Pliocene Roque Nublo debris avalanche deposit, Gran Canaria, Spain. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 94, 105-134.
- Meletlidis, S., A. Di Roberto, A., Pompilio, M., Bertagnini, A., Iribarren, I., Felpeto, A., Torres, P.A. and D'Oriano, C. (2012) Xenopumices from the 2011-2012 submarine eruption of El Hierro (Canary Islands, Spain): Constraints on the plumbing system and magma ascent. *Geophysical Research Letters*, 39, L17302.
- Menéndez, I., Silva, P.G., Martín-Betancor, M., Pérez-Torrado, F.J., Guillou, H. and Scaillet, S. (2008) Fluvial dissection, isostatic uplift, and geomorphological evolution of volcanic islands (Gran Canaria, Canary Islands, Spain). *Geomorphology*, 102, 189-203.
- Mitjavila, J. and Villa, I. (1993) Temporal evolution of Diego Hernández formation Las Cañadas, Tenerife and using the  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  method. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 6, 61-65.
- Montelli, R., Nolet, G., Dahlen, F.A., Masters, G. Engdahl, E.R. and Hung, Shu-Huei (2004) Finite-frequency tomography reveals a variety of plumes in the mantle. *Science*, 303, 338-343.

- Montelli, R., Nolet, G., Dahlen, F.A. and Masters, G. (2006) A catalogue of deep mantle plumes: New results from finite-frequency tomography, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7, Q11007.
- Moss, J.L., McGuire, W.J. and Page, D. (1999) Ground deformation monitoring of a potential landslide at La Palma, Canary Islands. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 94, 251-265.
- Muñoz, M. (1969) Ring complexes of Pajara in Fuerteventura island. *Bulletin Volcanologique*, 33, 840-861.
- Navarro Latorre, J.M. and Coello, J. (1989) Depressions originated by landslide processes in Tenerife. In: ESF meeting on Canarian Volcanism, Lanzarote. ESF, Strasbourg, pp. 150-152.
- Nichols, H.J. (2001) Petrologic and geochemical variation of a caldera-forming ignimbrite: the Abrigo Member, Diego Hernández Formation, Tenerife, Canary Islands (Spain). MSc Thesis, Washington State University, Pullman, p. 123.
- Pais, J. (1997). La Cucaracha II: Una Necrópolis única. In: eldiario.es, 2015 <<http://www.eldiario.es/temas/cucaracha/>>
- Paradas Herrero, A. and Fernández Santín, S. (1984). Estudio vulcanológico y geoquímico del maar de la Caldera del Rey. Tenerife (Canarias). *Estudios Geológicos*, 40(5-6), 285-313.
- Pararas-Carayannis, G. (2002) Evaluation of the threat of mega tsunami generation from postulated massive slope failures of island stratovolcanoes on La Palma, Canary Islands, and on the island of Hawaii. *Science of Tsunami Hazards*, 20(5), 251-277.
- Paris, R., Carracedo, J.C. and Pérez-Torrado, F.J. (2005a) Massive flank failures and tsunamis in the Canary Islands: past, present, future. *Zeitschrift für Geomorphologie Supplement Series*, 140, 37-54.
- Paris, R., Guillou, H., Carracedo, J.C. and Pérez Torrado, F.J. (2005b) Volcanic and morphological evolution of La Gomera (Canary Islands), based on new K-Ar ages and magnetic stratigraphy: implications for oceanic island evolution. *Journal of the Geological Society, London*, 162, 501-512.
- Pedrazzi, D., Martí, J., Geyer, A. (2013) Stratigraphy, sedimentology and eruptive mechanisms in the tuff cone of El Golfo (Lanzarote, Canary Islands). *Bulletin of Volcanology*, 75, 740.
- Pedrazzi, D., Becerril, L., Martí, J., Meletlidis, S., Galindo, I. (2014) Explosive felsic volcanism on El Hierro (Canary Islands). *Bulletin of Volcanology*, 76, 863.
- Pedroza, K., Troll, V.R., Burchardt, S., Klügel, A., Longpré, M.-A., Cachão, M., Ferreira, J., Deegan, F.M., Carracedo, J.C., Wiesmaier, S., Küppers, U., Hansteen, T.H., Soler, V., Berg, S.E., Dahren, B., Freda, C., Budd, D.A., Jolis, E.M., Jonsson, E., Meade, F.C., Harris, C., Blythe, L.S., Mancini, L. and Polacci, M. (2012) Folating stones off El Hierro, Canary Islands: fossil bearing high-silica xenoliths of pre-island sedimentary origin. *European Mineralogical Conference Vol. 1, EMC2012-594-3*.
- Pérez-Torrado, F.J. (2000) Volcanostratigrafía del grupo Roque Nublo, Gran Canaria. Las Palmas: Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. *Servicio de Publicaciones: Ediciones del Cabildo de Gran Canaria*, p. 459.

- Pérez-Torrado, F.J., Carracedo, J.C. and Mangas, J. (1995) Geochronology and stratigraphy of the Roque Nublo Cycle, Gran Canaria, Canary Islands. *Journal of the Geological Society, London*, 152, 807-818.
- Pérez-Torrado, F.J., Paris, R., Cabrera, M.C., Schneider, J.-L., Wassmer, P., Carracedo, J.C., Rodríguez-Santana, A. and Santana, F. (2006) Tsunami deposits related to flank collapse in oceanic volcanoes: The Agaete Valley evidence, Gran Canaria, Canary Islands. *Marine Geology*, 227, 135-149.
- Pérez-Torrado, F.J., Rodríguez-González, A., Carracedo, J.C., Fernández-Turiel, J.L., Guillou, H., Hansen, A. and Rodríguez Badiola, E. (2011) Edades C-14 Del Rift ONO de El Hierro (Islas Canarias). In: Turu, V. and Constante, A. (eds) *El Cuaternario en España y Áreas Afines. Avances en 2011*. Asociación Española para el Estudio del Cuaternario (AEQUA), Andorra, pp. 101-104.
- Pérez-Torrado, F.J., Carracedo, J.C., Rodríguez-González, A., Soler, V.R. and Wiesmayer, S. (2012) La erupción submarina de La Restinga en la isla de El Hierro, Canarias: Octubre 2011-Marzo 2012 (The submarine eruption of La Restinga (El Hierro, Canary Islands): October 2011-March 2012. *Estudios Geológicos*, 68(1), 5-27.
- Pérez-Torrado F.J., D. Gimeno, M. Aulinas, M.C. Cabrera, H. Guillou, A. Rodríguez González, G. Gisbert and J.L. Fernandez Turiel (2015) Polygonal feeder tubes filled with hydroclasts: a new volcanic shoreline marking subaerial-submarine transition. *Journal of the Geological Society, London*, 172, 29-43.
- Pittari, A. and Cas, R.A.F. (2004). Sole Marks at the base of the late Pleistocene Abriego Ignimbrite, Tenerife: implications for transport and depositional processes at the base of pyroclastic flows. *Bulletin of Volcanology*, 66, 356-363.
- Pittari, A., Cas, R.A.F. and Martí, J. (2005) The occurrence and origin of prominent massive, pumice-rich ignimbrite lobes within the late pleistocene Abriego ignimbrite, Tenerife, Canary Islands. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 139, 271-293.
- Pittari, A., Cas, R.A.F., Edgar, C.J., Nichols, H.J., Wolff, J.A. and Martí, J. (2006) The influence of palaeotopography on facies architecture and pyroclastic flow processes of a lithic-rich ignimbrite in a high gradient setting: the Abriego Ignimbrite, Tenerife, Canary Islands. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 152, 273-315.
- Pittari, A., Cas, R.A.F., Wolff, J.A., Nichols, H.J., Larson, P.B. and Martí, J. (2008) The Use of Lithic Clast Distributions in Pyroclastic Deposits to Understand Pre- and Syn-Caldera Collapse Processes: A Case Study of the Abriego Ignimbrite, Canary Islands. *Developments in Volcanology* 10, *Caldera Volcanism: Analysis, Modelling and Response*, 97-142.
- Plan Hidrológico Insular Memoria de La Palma In: Boletín Oficial de Canarias núm. 141, June 29 de octubre de 2001, 16232-16557.
- Real Audiencia de Canarias (1731) Descripción del estado a que tiene reducida el Volcán la Isla de Lanzarote desde el primer día de Septiembre de 1730 asta el 4 de Abril de 1731. Gyl., Leg. 89, Archivo de Simancas (Manuscrito, 56 p.).
- Ridley, W.I. (1971) The field relations of the Las Cañadas volcanoes, Tenerife, Canary Islands. *Bulletin of Volcanology*, 35, 318-334.

- Rihm, R., Jacobs, C.L., Krastel, S., Schmincke, H.-U. and Alibes, B. (1998) Las Hijas seamounts – the next Canary Island? *Terra Nova*, 10(3), 121-125.
- Rivera, J., Lastras, G., Canals, M., Acosta, J., Arrese, B., Hermida, N., Micallef, A., Tello, O., Amblas, D., (2013) Construction of an oceanic island: Insights from El Hierro 2011-2012 submarine volcanic eruption. *Geology*, 41, 355-358.
- Rivera, J., Hermida, N., Arrese, B., González-Aller, D., Sánchez de Lamadrid, J.L., Gutiérrez de la Flor, D. and Acosta, J. (2014) Bathymetry of a new-born submarine volcano: El Hierro, Canary Islands. *Journal of Maps*, 10, 82-89.
- Rodríguez-Badiola, E., Pérez-Torrado, F.J., Carracedo, J.C. and Guillou, H. (2006) Petrografía y geoquímica del edificio volcánico Teide-Pico Viejo y las dorsales nores- te y noroeste de Tenerife. In: Carracedo, J.C. (ed.) *Los volcanes del Parque Nacional del Teide/El Teide, Pico Viejo y las dorsales activas de Tenerife*. Madrid: Naturaleza y Parques Nacionales, Ministerio de Medio Ambiente, pp. 129-186.
- Rodríguez-Gonzalez, A., Fernandez-Turiel, J.L., Perez-Torrado, F.J., Hansen, A., Aulinas, M., Carracedo, J.C., Gimeno, D., Guillou, H., Paris, R. and Paterne, M. (2009) The Holocene volcanic history of Gran Canaria island: implications for volcanic hazards. *Journal of Quaternary Science*, 24, 697-709.
- Rodríguez-Gonzalez, A., Fernandez-Turiel, J.L., Pérez-Torrado, F.J., Paris, R., Gimeno, D., Carracedo, J.C. and Aulinas, M. (2012) Factors controlling the morphology of monogenetic basaltic volcanoes: The Holocene volcanism of Gran Canaria (Canary Islands, Spain). *Volcano Geomorphology: landforms, processes and hazards*, 136, 31-44.
- Rodríguez-Losada, J.A. and Martínez-Frias, J. (2004) The felsic complex of the Vallehermoso Caldera: interior of an ancient volcanic system (La Gomera, Canary Islands). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 137, 261-284.
- Romero Ruiz, C. (1991) Las manifestaciones volcánicas históricas del Archipiélago Canario (2 Tomos). Gobierno de Canarias (Consejería de Política Territorial), Tenerife.
- Rumeu de Armas, A and Araña, V., (1982) Diario pormenorizado de la erupción volcáni- ca de Lanzarote en 1824. *Anuario de estudios atlánticos*, 28, 15-61.
- Schirnack, C., van den Bogaard, P. and Schmincke, H.-U. (1999) Cone sheet formation and intrusive growth of an oceanic island – The Miocene Tejeda complex on Gran Canaria (Canary Islands). *Geology*, 27, 207-210.
- Schmincke, H.-U. (1993) *Geological field guide of Gran Canaria*. Kiel: Pluto Press, pp. 1-227.
- Schmincke, H. U., Park, C. and Harms, E. (1999) Evolution and environmental impacts of the eruption of Laacher See Volcano (Germany) 12,900 a BP. *Quaternary International*, 61(1), 161-72.
- Schmincke, H.-U. (2004) *Volcanism*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, p. 324.
- Schmincke, H.-U., and Graf, G. (2000) DECOS OMEX II, Cruise No. 43, 25 November 1998 – 14 January 1999, Meteor-Berichte, 00-2, Universität Hamburg, Hamburg, Germany. 99 pp.
- Schmincke, H.U. and Rihm, R. (1994) Ozeanvulkan 1993, Cruise No. 24, 15 April-9 May 1993. Meteor-Bericht 94-2, Universität Hamburg, Hamburg, Germany. 88 pp.

- Schmincke, H.U. and Segschneider, B. (1998) Shallow submarine to emergent basaltic shield volcanism of Gran Canaria: Evidence from drilling into the volcanic apron (ODP Leg 157). In: Weaver PPE, Schmincke H-U and Firth JV (eds) *Proc ODP, Sci. Results, 157*: College Station, TX (Ocean Drilling Program), pp. 141-181.
- Schmincke, H.-U. and Sumita M. (1998) Volcanic evolution of Gran Canaria reconstructed from apron sediments: Synthesis of VICAP project drilling. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 157.
- Schmincke, H.-U. and Sumita, M. (2010) Geological Evolution of the Canary Islands: a young volcanic archipelago of the old African continent. Görres Druckerei und Verlag GmbH, Koblenz (Germany), 196p.
- Schmincke, H.U., Weaver, P.P.E., Firth, J.V. and Shipboard Scientific Party (1995) *Proc ODP, Initial Reports*, Leg 157, College Station TX, (Ocean Drilling Program), p. 843.
- Sigmarrsson, O., Carn, S. and Carracedo, J.C. (1998) Systematics of U-series nuclides in primitive lavas from the 1730-36 eruption on Lanzarote, Canary Islands, and implications for the role of garnet pyroxenites during oceanic basalt formations. *Earth and Planetary Science Letters*, 162, 137-151.
- Sigmarrsson, O., Laporte, D., Carpentier, M., Devouard, B., Devidal, J.-L. and Marti, J. (2013) Formation of U-depleted rhyolite from a basanite at El Hierro, Canary Islands. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 165(3), 601-622.
- Singer, B. and Brown, L.L. (2002) The Santa Rosa Event: Ar-40/Ar-39 and paleomagnetic results from the Valles rhyolite near Jaramillo Creek, Jemez Mountains, New Mexico. *Earth and Planetary Science Letters*, 197, 51-64.
- Singer, B. S., M. K. Relle, K. A. Hoffman, A. Battle, C. Laj, H. Guillou, and J. C. Carracedo (2002) Ar/Ar ages from transitionally magnetized lavas on La Palma, Canary Islands, and the geomagnetic instability timescale. *Journal of Geophysical Research*, 107(B11), 2307.
- Solana, M.C., and Aparicio, A. (1999) Reconstruction of the 1706 Montaña Negra eruption. Emergency procedures for Garachico and El Tanque, Tenerife, Canary Islands. *Geological Society, London, Special Publications*, 161, 209-216.
- Solana, M.C. and Kilburn, C.R.J. (2003) Public awareness of landslide hazards: the Barranco de Tirajana, Gran Canaria, Spain. *Geomorphology*, 54, 39-48.
- Solana, M.C., Kilburn, C.R.J., Rodriguez Badiola, E. and Aparicio, A. (2004) Fast emplacement of extensive pahoehoe flow-fields: the case of the 1736 flows from Montaña de las Nueces, Lanzarote. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 132, 189-207.
- Sperling, F.N., Washington, R. and Whittaker, R.J. (2004) Future climate change of the subtropical North Atlantic: implications for the cloud forests of Tenerife. *Climatic Change*, 65, 103-123.
- Staudigel, H., and Schmincke, H. (1981) Structural evolution of a seamount: evidence from the uplifted intraplate seamount on the island of La Palma, Canary Islands. *Eos*, 62, 1075.
- Staudigel, H. and Schmincke, H.U. (1984) The Pliocene seamount series of La Palma, Canary Islands. *Journal of Geophysical Research* 89(B-13): 11190-11215.

- Staudigel, H., Feraud, G. and Giannerini, G. (1986) The history of intrusive activity on the island of La Palma (Canary Islands). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 27, 299-322.
- Steiner, C., Hobson, A., Favre, P., Stampfli, G.M., Hernandez, J. (1998) Mesozoic sequence of Fuerteventura (Canary Islands): Witness of Early Jurassic sea-floor spreading in the central Atlantic. *Geological Society of America Bulletin*, 110(10): 1304-1317.
- Stillman, C.J. (1987) A Canary Island Dyke Swarm: Implications for formation of Oceanic Islands extensional fissural volcanism. In: Halls, H.C., Fahrig, W.F. (eds) Mafic dyke swarms: a collection of papers based on the proceedings of an international conference held at Erindale College, University of Toronto, Ontario, Canada, June 4 to 7, 1985. *Geological Association of Canada Special Publication*, 34, International Lithosphere Program 120, St. John's Nfld., Canada, p.503.
- Stillman, C.J. (1999) Giant Miocene landslides and the evolution of Fuerteventura, Canary Islands. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 94 (1-4), 89-104.
- Stroncik, N.A., Klügel, A. and Hansteen, T.H. (2009) The magmatic plumbing system beneath El Hierro (Canary Islands): constraints from phenocrysts and naturally quenched basaltic glasses in submarine rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 157(5), 593-607.
- Sumner, J.M. and Wolff, J. (2003) Petrogenesis of mixed-magma, high-grade, peralkaline ignimbrite "TL" (Gran Canaria): diverse styles of mixing in a replenished, zoned magma chamber. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 126, 109-126.
- Thirlwall, M.F., Singer, B.S. and Marriner, G.F. (2000) <sup>39</sup>Ar-<sup>40</sup>Ar ages and geochemistry of the basaltic shield stage of Tenerife, Canary Islands, Spain. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 103(1-4):247-297.
- Thomas, L.E., Hawkesworth, C.J., Van Calsteren, P., Turner, S.P. and Rogers, N.W. (1999) Melt generation beneath ocean islands: a U-Th-Ra isotope study from Lanzarote in the Canary Islands. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63, 4081-4099.
- Troll V.R. and Schmincke H.-U. (2002) Magma mixing and crustal recycling recorded in ternary feldspar from compositionally zoned peralkaline ignimbrite 'A', Gran Canaria, Canary Islands. *Journal of Petrology* 43, 243-270.
- Troll, V.R., Walter, T.R. and Schmincke, H.-U. (2002) Cyclic caldera collapse: Piston or piecemeal subsidence? Field and experimental evidence. *Geology*, 30, 135-138.
- Troll, V. R., Klügel, A., Longpré, M.-A., Burchardt, S., Deegan, F. M., Carracedo, J. C., Wiesmaier, S., Kueppers, U., Dahren, B., Blythe, L. S., Hansteen, T. H., Freda, C., Budd, D. A., Jolis, E. M., Jonsson, E., Meade, F. C., Harris, C., Berg, S. E., Mancini, L., Polacci, M., and Pedroza, K (2011) Floating stones off El Hierro (Canary Islands, Spain): the peculiar case of the October 2011 eruption. *Solid Earth Discussions* 3, 975-999.
- Troll, V.R., Klügel, A., Longpré, M.-A., Burchardt, S., Deegan, F.M., Carracedo, J.C., Wiesmaier, S., Kueppers, U., Dahren, B., Blythe, L.S., Hansteen, T., Freda, C., Budd, D.A., Jolis, E.M., Jonsson, E., Meade, F., Harris, C., Berg, S., Mancini, L., Polacci, M. and Pedroza, K. (2012) Floating stones off El Hierro, Canary Islands: xenoliths of pre-island sedimentary origin in the early products of the October 2011 eruption. *Solid Earth*, 3, 97-110.

- Troll, V.R., Deegan, F.M., Burchardt, S., Zaczek, K., Carracedo, J.C., Meade, F.C., Soler, V. Cachao, M., Ferreira, J., Barker, A.K. (2015) Nannofossils: the smoking gun for the Canarian hotspot. *Geology Today*, 31(4), 137-145.
- Urgelés, R., Canals, M., Baraza, J., Alonso, B. and Masson, D.G. (1997) The last major megalandslides in the Canary Islands: the El Golfo debris avalanche and the Canary debris flow, west Hierro Island. *Journal of Geophysical Research*, 102, 305-323.
- Urgelés, R., Canals, M., Baraza, J. and Alonso, B. (1998) Seismostratigraphy of the western flanks of El Hierro and La Palma (Canary Islands): a record of Canary Island volcanism. *Marine Geology*, 146, 225-241.
- Urgelés, R., Masson, D.G., Canals, M., Watts, A.B. and Le Bas, T. (1999) Recurrent large-scale landsliding on the west flank of La Palma, Canary Islands. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 104, 25331-25348.
- Urgelés, R., Canals, M. and Masson, D.G. (2001) Flank stability and processes off the western Canary Islands: a review from El Hierro and La Palma. *Scientia Marina*, 65, 21-31.
- van den Bogaard, P. (2013) The origin of the Canary Island Seamount Province – new ages of old seamounts. *Scientific Reports*, 3, 2107: 1-7.
- van den Bogaard P. and Schmincke H.-U. (1998) Chronostratigraphy of Gran Canaria. In: Weever, P.P.E., Schmincke, H.U., Firth, J.V., Duffield, W.A. (eds): *Proceedings of the Ocean Drilling Program*, Scientific results 157: College Station, Texas (Ocean Drilling Program): pp. 127-140.
- Vogt, P.R. and Smoot, N.C. (1984) The Geisha Guyots – Multibeam bathymetry and morphometric interpretation. *Journal of Geophysical Research*, 89(NB13): 1085-1107.
- Walter, T. and Schmincke, H.-U. (2002) Rifting, recurrent landsliding and Miocene structural reorganization on NW-Tenerife (Canary Islands). *International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundschau)*, 91(4), 615-628.
- Walter, T.R. and Troll, V.R. (2001) Formation of caldera periphery faults, an experimental study. *Bulletin of Volcanology*, 63: 191-203.
- Walter, T.R. and Troll, V.R. (2003) Experiments on rift zone formation in unstable volcanic edifices. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 127, 107-120.
- Walter T.R., Troll V.R., Caileau B., Schmincke H.-U., Amelung F. and van den Bogaard P. (2005) Rift zone reorganization through flank instability on ocean islands – an example from Tenerife, Canary Islands. *Bulletin of Volcanology*, 65, 281-291.
- Ward, S.N. and Day, S. (2001) Cumbre Vieja Volcano – Potential collapse and tsunami at La Palma, Canary Islands. *Geophysical Research Letters*, 28(17), 3397-3400.
- Watts, A.B. and Masson, D.G. (1995) A giant landslide on the north flank of Tenerife, Canary Islands. *Journal of Geophysical Research*, 100, 24487-24498.
- Watts, A.B. and Masson, D.G. (2001) New sonar evidence for recent catastrophic collapses of the north flank of Tenerife, Canary Islands. *Bulletin of Volcanology*, 63(1), 8-19.
- Wiesmaier, S., Deegan, F.M., Troll, V.R., Carracedo, J.C., Chadwick, J.P. and Chew, D.M. (2011) Magma mixing in the 1100 AD Montaña Reventada composite eruption, Tenerife, Canary Islands: Interaction between rift zone and central volcano plumbing systems. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 162, 651-669.

- Wiesmaier, S., Troll, V. R., Carracedo, J. C., Ellam, R. M., Bindeman, I. and Wolff, J. A. (2012). Bimodality of Lavas in the Teide-Pico Viejo Succession in Tenerife – the Role of Crustal Melting in the Origin of Recent Phonolites. *Journal of Petrology*, 53, 2465-2495.
- Wiesmaier, S., Troll, V. R., Wolff, J. A. and Carracedo, J. C. (2013). Open-system processes in the differentiation of mafic magma in the Teide-Pico Viejo succession, Tenerife. *Journal of the Geological Society* 170, 557- 570.
- Wolff, J. A. (1983) Ph.D. thesis, Univ. of London.
- Wolff, J.A., Grandy, J.S. and Larson, P.B. (2000) Interaction of mantle-derived magma with island crust? Trace element and oxygen isotope data from the Diego Herandez Formation, Las Cañadas, Tenerife. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 103, 343-366.
- Zazo, C., Goy, J.L., Hillaire-Marcel, C., Gillot, P.Y., Soler, V., González, J.A., Dabrio, C.J. and Ghaleb, B. (2002) Raised marine sequences of Lanzarote and Fuerteventura revisited – a reappraisal of relative sea-level changes and vertical movements in the eastern Canary Islands during Quaternary. *Quaternary Science Reviews*, 21, 2019-1046.
- Zaczek, K., Troll, V.R., Cachao, M., Ferreira, F., Deegan, F.M., Carracedo, J.C., Meade, F.C., Burchardt, S. (2015) Nannofossils in 2011 El Hierro eruptive products reinstate plume model for Canary Islands. *Scientific Reports*, 5, 7945; p.5.