
"PROCESSING AND ANALYZING LARGE VOLUMES
OF GEOSPATIAL DATA USING GEOGRAPHIC
INFORMATION SYSTEMS AND SMART
APPLICATIONS"

PROCESADO Y ANÁLISIS DE GRANDES VOLÚMENES DE DATOS
GEOESPACIALES USANDO SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y
APLICACIONES INTELIGENTES

AUTHOR

PABLO FERNÁNDEZ MONIZ

SUPERVISORS

JOSE PABLO SUÁREZ RIVERO, PHD
AGUSTÍN TRUJILLO PINO, PHD

LAS PALMAS DE GRAN CANARIA, OCTUBRE 2024

DOCTORADO EN TECNOLOGÍAS DE LA TELECOMUNICACIONES E INGENIERÍA
COMPUTACIONAL



AGRADECIMENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que me han brindado su apoyo incondicional a lo largo de este camino. Esta tesis es el resultado de años de esfuerzo y dedicación, pero también es fruto del respaldo y la inspiración de quienes han sido fundamentales en su realización.

En primer lugar, mi más sincero agradecimiento es para mi familia. A mi madre, por ser siempre mi apoyo incondicional y por ofrecerme esa red de seguridad que me ha permitido crecer y desarrollarme. A mi padre, por ser una referencia constante en el ámbito académico-universitario, con su visión pragmática sobre las reglas que rigen este sector. A Vanessa, por su inquebrantable apoyo, por llenar de cariño nuestro día a día, y por respetar mi desarrollo profesional. A pesar de estar en un sector completamente diferente, me has enseñado a optimizar e invertir bajo los más sólidos principios.

Esta tesis no solo refleja años de estudio y esfuerzo, sino también una trayectoria profesional que podría considerarse algo atípica dentro del marco de una tesis doctoral tradicional. A lo largo de los años, he combinado diferentes fases de mi carrera profesional con la materialización de este trabajo. Desde mis inicios en la especialización en Sistemas de Información Geográfica donde Héctor, con su visión disruptiva, y Juan Pedro, con su enfoque científico-técnico, fueron fuentes de inspiración y en cierto modo ayudaron a crear el caldo de cultivo para construir los pilares de una de mis grandes aventuras empresariales, y también el germen de este trabajo: la dirección del servicio de Geoinformática e Inteligencia de Datos de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Durante siete años, combinamos las necesidades del mundo público-privado con el ámbito científico. Aquí es donde entran en juego mis tutores de tesis y ahora amigos: Jose Pablo Suárez Rivero, por su visión positiva y capacidad resiliente para superar obstáculos, y Agustín Trujillo Pino, por su vocación universitaria y compromiso eterno. La orientación, conocimientos y consejos han sido cruciales en cada etapa de esta investigación. Les agradezco su paciencia, por desafiarme a pensar críticamente, y por su constante disposición para ayudarme a superar los desafíos que surgieron en el camino. No puedo dejar de mencionar a todos los compañeros que pasaron por el servicio de Geoinformática e Inteligencia de Datos de la ULPGC, sin cuya colaboración muchos de estos trabajos no habrían sido posibles.

A Jochen Wendel y Alexandru Nichersu, por ser mis anfitriones durante mi estancia en el EIFER (European Institute for Energy Research by EDF and KIT), Alemania. Donde no solo adquirí conocimientos tecnológicos, sino también valiosas perspectivas tanto en

el ámbito profesional como en la vida personal.

Durante mis años en CARTO, viví la experiencia del entorno de las *start-ups* tecnológicas, marcadas por la investigación, el desarrollo y la innovación a alta velocidad. En este contexto, personas como Paula me enseñaron que es posible mantener la inteligencia emocional en un mundo tecnológico, donde a menudo nos perdemos en acrónimos y tecnicismos que, en muchas ocasiones, más que ayudar, nos alejan de las soluciones reales de los problemas. Aprendí que se pueden gestionar situaciones de alto nivel con naturalidad y humanidad, cualidades que, lamentablemente, estamos perdiendo en los tiempos modernos y especialmente en el sector tecnológico. En la última etapa en CARTO, aunque breve, tuve el placer de trabajar con Luis Sanz, cuya visión ejecutiva, pragmática y de negocios complementó la perspectiva que adquirí en la dirección del servicio de Geoinformática e Inteligencia de Datos de la ULPGC, y que, en parte, han inspirado secciones de cifras de negocio que se presentan a lo largo de la tesis.

A Pablo Mayer, quiero agradecerle la reciente fase en el IOCAG (Instituto de Oceanografía y Cambio Global), donde su bondad y dedicación se combinan con el más alto nivel científico. También a Emma Pérez, cuyo apoyo y foco fue clave para materializar este trabajo. Siguiendo en el ámbito del IOCAG, no puedo dejar de mencionar a Luis Hernández, quien en parte fue uno de los precursores para desarrollar mi carrera en las TIG, promoviendo mi paso a Sevilla en mis inicios profesionales.

Finalmente, agradezco a todos mis amigos y colegas que, de una u otra manera, han contribuido a la finalización de esta tesis. Sus palabras de aliento, su compañía y sus perspectivas han enriquecido mi experiencia académica y personal.

A todos ustedes, gracias de todo corazón.

ABSTRACT

This thesis explores a fundamental area for the management, analysis, and visualization of large volumes of spatial data, particularly within a context where the volume and complexity of georeferenced data have exponentially increased due to the proliferation of data capture technologies, such as remote sensors generating high-frequency real-time data. This work is focused on developing methodologies and architectures that integrate Geographic Information Systems (GIS) with advanced technologies such as Big Data and cloud computing, providing a robust framework for handling large geospatial datasets and their application in decision-making.

One of the main contributions of this thesis is the integration of traditional Geographic Information Systems (GIS) with emerging technologies, which enables not only the efficient management of large datasets but also the development of advanced predictive models that allow forecasting and simulating future scenarios with high precision. This approach is particularly relevant in fields such as critical infrastructure management, where the ability to anticipate issues and optimize resources is crucial to maintaining efficient and safe operations. In this context, Decision Support Systems (DSS) play a vital role within the framework of intelligent applications by allowing the analysis of complex scenarios and offering informed recommendations based on data processed by GIS.

Throughout the thesis, specific software architectures designed for handling geospatial data are presented. These modular and scalable architectures allow the integration of data from multiple sources, such as real-time sensor data, databases, and computational simulations. This integration approach is essential in applications where dynamic and static data must be combined to generate a comprehensive view of a system. The ability of these architectures to handle large volumes of data and process them quickly represents a significant advancement, enabling the implementation of solutions in critical scenarios such as emergency management or the management of essential resources.

The thesis also explores the application of geospatial data visualization techniques, significantly enhancing decision-makers ability to interpret and use the presented information. Visualizing data in two, three, and even four dimensions facilitates understanding complex spatio-temporal relationships and allows more intuitive interactions with the data. These visualization techniques enable users to engage with the data more naturally, offering a richer and more comprehensible experience. Effectively representing geographic information is especially useful in contexts where it is necessary

to communicate complex information to diverse audiences, including both technical experts and decision-makers without specialized training in the geospatial field or the general public.

One of the most notable applications of the methodologies developed in this thesis is the SmartPort system, specifically implemented at the Port of Las Palmas in Gran Canaria. This system exemplifies how the developed architectures can integrate data from various sources, including sensors that monitor environmental conditions, maritime traffic, and other critical factors for port operations. The ability to process and analyze this data in real-time allows for more efficient port management, optimizing resource allocation, improving operational safety, and reducing costs associated with inefficiencies. Additionally, this system demonstrates how integrating emerging technologies with GIS can transform the management of critical infrastructures, providing advanced tools for data-driven decision-making.

Another key example developed in this thesis is the integrated water cycle management system, which enhances efficiency and sustainability in water resource management. This system enables monitoring and management of water networks, including leak detection and localization, water usage optimization, and improved operational sustainability. This system benefits end-users by providing detailed information about their consumption or the state of their supply network and enables administrations to manage resources more effectively, reducing losses and enhancing long-term sustainability. Additionally, the management of day-to-day data for massive digitizing, combined with historical data management that allows not only capturing snapshots at specific moments but also visualizing and recovering any past state of the system, represents a novel and significant contribution of this work.

Through Research and Development (R&D) use cases, the thesis offers a significant contribution to the academic and scientific fields and knowledge transfer by proposing a methodological framework for implementing intelligent decision-support systems based on GIS, which has been featured in various scientific publications and successfully executed projects. This framework includes not only the necessary technologies and architectures but also a systematic approach to integrating data from diverse sources, data modeling, and developing predictive models capable of simulating different scenarios to provide recommendations based on solid data. The versatility of this framework, which can be applied across different contexts and sectors, enhances its value.

A key aspect of the thesis is its focus on validating the developed systems in real-world environments within the scope of R&D projects. This validation is crucial as it demonstrates the applicability of the proposed solutions and evaluates their impact in terms of operational efficiency, economic benefits, and improved decision-making. The results obtained from implementing these systems in the Port of Las Palmas and water cycle management underscore the effectiveness of the developed methodologies and confirm the central hypothesis of the thesis: integrating advanced technologies with GIS can significantly improve the management of infrastructures and resources,

contributing to sustainable development and optimizing critical operations.

The thesis also explores the challenges and opportunities associated with implementing advanced technologies in geospatial data management. One of the most notable challenges is ensuring interoperability between different systems and platforms, especially when integrating data from multiple sources with varying formats, systems, and standards. The thesis addresses this challenge by proposing flexible and scalable architectures that enable efficient data integration and facilitate collaboration between different entities and systems.

In terms of opportunities, the thesis highlights the potential of emerging technologies to transform the management of infrastructures and resources in an increasingly interconnected world. The ability of GIS to integrate and analyze large volumes of data in real-time opens up new possibilities for optimizing processes and improving operational efficiency across a wide range of sectors. Furthermore, the use of technologies such as Artificial Intelligence (AI), Big Data, and cloud computing, in combination with GIS, enables the development of more precise predictive models and adaptive solutions that can respond quickly to environmental changes and offer data-driven recommendations in real-time.

This thesis is based on documents published in (P. Fernández et al., 2016a), (Pablo Fernández et al., 2016), (Pablo Fernández et al., 2017), (Pablo Fernández et al., 2018), and (Fernández Moniz et al., 2020).

Keywords: Geographic Information Systems (GIS), Geospatial, Big Data, Smart Applications, Decision Support Systems (DSS), Real-time Data Processing, Infrastructure Management, Water Resource Management, Predictive Modeling, Spatial Data Visualization, Artificial Intelligence (AI), Sensor Integration, Cloud Computing

RESUMEN

Esta tesis explora un área fundamental para la gestión, análisis y visualización de grandes cantidades de datos espaciales, particularmente en un contexto donde el volumen y la complejidad de los datos georreferenciados han aumentado exponencialmente debido a la proliferación de tecnologías de captura de datos, como sensores remotos, que generan datos en tiempo real con alta frecuencia. Este trabajo se centra en el desarrollo de metodologías y arquitecturas que integran los Sistemas de Información Geográfica (SIG) con tecnologías avanzadas como el Big Data y la computación en la nube, proporcionando un marco robusto para el manejo de grandes volúmenes de datos geoespaciales y su aplicación en la toma de decisiones.

Una de las principales contribuciones de esta tesis es la integración de los SIG tradicionales con tecnologías emergentes, lo que permite no solo gestionar eficientemente grandes volúmenes de datos, sino también desarrollar modelos predictivos avanzados capaces de predecir y simular situaciones futuras con un alto grado de precisión. Este enfoque es particularmente relevante en campos como la gestión de infraestructuras críticas, donde la capacidad de anticipar problemas y optimizar recursos es crucial para mantener operaciones eficientes y seguras. En este contexto, los Sistemas de Apoyo a la Decisión o *Decision Support Systems* (DSS) desempeñan un papel esencial dentro del marco de las aplicaciones inteligentes, al permitir analizar escenarios complejos y ofrecer recomendaciones informadas basadas en los datos procesados por los SIG.

A lo largo de la tesis, se exponen arquitecturas de software diseñadas específicamente para el manejo de datos geoespaciales. Estas arquitecturas modulares y escalables, permiten la integración de datos provenientes de múltiples fuentes, como datos de sensores en tiempo real, bases de datos y simulaciones computacionales. Este enfoque de integración es vital en aplicaciones donde es necesario combinar datos dinámicos y estáticos para generar una visión completa de un sistema. La capacidad de estas arquitecturas para manejar grandes volúmenes de datos y procesarlos con rapidez representa un avance significativo, permitiendo la implementación de soluciones en escenarios críticos como la gestión de emergencias o de recursos esenciales.

A su vez se presenta la aplicación de técnicas de visualización de datos geoespaciales, para permitir significativamente la capacidad de los tomadores de decisiones para interpretar y utilizar la información presentada. La visualización de datos en dos, tres, e incluso cuatro dimensiones, facilita la comprensión de las relaciones espacio-temporales complejas y permite una interacción más intuitiva con los datos. Estas técnicas de

visualización permiten a los usuarios interactuar con los datos de manera más intuitiva, ofreciendo una experiencia más rica y comprensible. La capacidad de representar la información geográfica eficazmente, es especialmente útil en contextos donde es necesario comunicar información compleja a audiencias diversas, que pueden incluir tanto expertos técnicos como responsables de la toma de decisiones sin formación especializada en el campo geoespacial o el público general.

Uno de los ejemplos más notables de la aplicación de las metodologías desarrolladas en esta tesis es el sistema de gestión inteligente de puertos o *SmartPort*, específicamente implementado en el Puerto Marítimo de Las Palmas de Gran Canaria. Este sistema ejemplifica cómo las arquitecturas desarrolladas pueden integrar datos de diversas fuentes, incluyendo sensores que monitorizan condiciones ambientales, tráfico marítimo, y otros factores críticos para la operación portuaria. La capacidad de procesar y analizar estos datos en tiempo real permite una gestión más eficiente del puerto, optimizando la asignación de recursos, mejorando la seguridad operativa y reduciendo costos asociados con la ineficiencia. Además, este sistema demuestra cómo la integración de tecnologías emergentes con SIG puede transformar la gestión de infraestructuras críticas, proporcionando herramientas avanzadas para la toma de decisiones basadas en datos.

Otro ejemplo destacado desarrollado en esta tesis es el sistema de gestión del ciclo integral del agua, que permite mejorar la eficiencia y sostenibilidad en la gestión de recursos hídricos. Este sistema da la capacidad de gestionar y monitorizar las redes de agua, por ejemplo, la detección y localización de fugas, la optimización del uso del agua y la mejora de la sostenibilidad operativa. Este sistema no solo beneficia a los usuarios finales al proporcionarles información detallada sobre su consumo o el estado de su red de suministro, sino que también permite a las administraciones gestionar los recursos de manera más efectiva, reduciendo pérdidas y mejorando la sostenibilidad a largo plazo. Así mismo, la gestión de todo los datos para poder digitalizar masivamente durante el día a día, unido una gestión de datos históricos que no solo se limita a crear fotografías en momentos puntuales, sino que además permite visualizar y recuperar cualquier estado pasado del sistema representa una aportación novedosa y significativa de este trabajo.

Bajo casos prácticos de Investigación y Desarrollo (I+D), la tesis ofrece una contribución significativa al campo académico y científico, pero además en transferencia de conocimiento, al proponer un marco metodológico para la implementación de sistemas inteligentes de apoyo en la toma de decisiones basados en SIG, el cual ha sido expuesto en diversas publicaciones científicas y proyectos ejecutados con éxito. Este marco incluye no solo las tecnologías y arquitecturas necesarias, sino también un enfoque sistemático para la integración de datos de diversas fuentes, el modelado de los datos y el desarrollo de modelos predictivos que son capaces de simular diferentes escenarios para ofrecer recomendaciones basadas en datos sólidos. La versatilidad de este marco, que puede aplicarse en diferentes contextos y sectores, refuerza su valor.

Un aspecto clave de la tesis es su enfoque en la validación de los sistemas desarrollados en entornos reales, en el marco de proyectos de I+D. Esta validación es crucial, ya que

permite no solo demostrar la aplicabilidad de las soluciones propuestas, sino también evaluar su impacto en términos de eficiencia operativa, económica y mejora en la toma de decisiones. Los resultados obtenidos en la implementación de estos sistemas en el Puerto de Las Palmas y en la gestión del ciclo del agua subrayan la efectividad de las metodologías desarrolladas y confirman la hipótesis central de la tesis: la integración de tecnologías avanzadas con los SIG puede generar mejoras significativas en la gestión de infraestructuras y recursos, contribuyendo al desarrollo sostenible y a la optimización de operaciones críticas.

La tesis también explora los desafíos y oportunidades asociados con la implementación de tecnologías avanzadas en la gestión de datos geoespaciales. Uno de los desafíos más destacados es asegurar la interoperabilidad entre diferentes sistemas y plataformas, especialmente cuando se trata de integrar datos de múltiples fuentes con diferentes formatos, sistemas y estándares. La tesis aborda este desafío proponiendo soluciones de arquitecturas flexibles y escalables, que permiten la integración de datos de manera eficiente y facilitan la colaboración entre diferentes entidades y sistemas.

En términos de oportunidades, la tesis destaca el potencial de las tecnologías emergentes para transformar la gestión de infraestructuras y recursos en un mundo cada vez más interconectado. La capacidad de los SIG para integrar y analizar grandes volúmenes de datos en tiempo real abre nuevas posibilidades para optimizar procesos y mejorar la eficiencia operativa en una amplia gama de sectores. Además, la utilización de tecnologías como la Inteligencia Artificial (IA), el Big Data y la computación en la nube, en combinación con los SIG, permite desarrollar modelos predictivos más precisos y soluciones más adaptativas, que pueden responder rápidamente a cambios en el entorno y ofrecer recomendaciones basadas en datos en tiempo real.

Esta tesis se basa en documentos publicados en (P. Fernández et al., 2016a), (Pablo Fernández et al., 2016), (Pablo Fernández et al., 2017), (Pablo Fernández et al., 2018) y (Fernández Moniz et al., 2020).

Palabras-Clave: Sistemas de Información Geográfica (SIG), Geoespacial, Aplicaciones Inteligentes, Sistemas de Apoyo a la Decisión, Procesamiento de Datos en Tiempo Real, Gestión de Infraestructuras, Gestión de Recursos Hídricos, Modelado Predictivo, Visualización de Datos Espaciales, Inteligencia Artificial (IA), Integración de Sensores, Computación en la Nube

ÍNDICE DE GENERAL

Índice de General	xv
Índice de Figuras	xxi
Índice de Tablas	xxvii
1. Introducción y Objetivos de la Tesis	1
1.1. Contexto y Justificación	1
1.2. Hipótesis de Trabajo	2
1.3. Objetivos	2
1.4. Contribuciones de la tesis	3
1.5. Metodología	3
1.5.1. Diseño de la Investigación	4
1.5.2. Herramientas y Tecnologías Utilizadas	4
1.5.3. Estrategias de Validación	5
1.5.4. Limitaciones de la Metodología	5
1.6. Estructura de la Tesis	6
2. Tecnologías de la Información Geográfica	7
2.1. Primeros Avances en Cartografía y Datos Espaciales	7
2.1.1. La Era Digital y el Surgimiento de los SIG	8
2.1.2. Avances Tecnológicos y Expansión de Aplicaciones	9
2.1.3. La Era del Big Data y la Integración con Tecnologías Emergentes	12
2.1.4. Los SIG y las Bases de Datos	14
2.2. Componentes de los Sistemas de Información Geográfica	15
2.3. SaaS versus no-SaaS dentro de los SIG	17
2.3.1. Implementación y Accesibilidad	17
2.3.2. Coste económico	17
2.3.3. Mantenimiento y Actualizaciones	18
2.3.4. Escalabilidad	18
2.3.5. Integración y Colaboración	18
2.3.6. Ejemplos de Uso	19
2.4. Datos e información en los SIG	21

2.4.1.	Tipos de datos en los SIG	21
2.4.2.	Datos Alfanuméricos o Temáticos	24
2.5.	Otros Tipos de Datos Especializados	26
2.6.	Formatos Físicos más Comunes en los SIG	29
2.6.1.	Formatos de Bases de Datos Geoespaciales	31
2.7.	Visualización de Datos Geográficos	32
2.7.1.	Principios de Visualización de Datos Geográficos	33
2.7.2.	Técnicas de Visualización de Datos Geográficos	33
2.7.3.	Librerías para Desarrollo de Aplicaciones	35
2.8.	Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE)	36
2.8.1.	Definición y Concepto de IDE	36
2.8.2.	Componentes de una IDE	37
2.8.3.	Evolución Histórica de las IDEs	37
2.8.4.	Ejemplos de Grandes Proyectos Gubernamentales de IDE	39
2.8.5.	Beneficios y desafíos de las IDE	39
3.	Desafíos y Proyección de los Sistemas de Información Geográfica	41
3.1.	Aplicaciones de las Tecnologías de la Información Geográfica	45
3.2.	Cifras de Negocio de las TIG	49
3.2.1.	Principales Causas de Previsión de Crecimiento	49
3.2.2.	Proyecciones de Mercado por Sector	50
4.	Sistemas de Apoyo a la Toma de Decisiones	53
4.1.	Componentes y Características de una Aplicación Inteligente	53
4.2.	Introducción a los Sistemas de Apoyo a la Decisión	55
4.2.1.	Fundamentos de los Sistemas de Apoyo a la Decisión	55
4.2.2.	Beneficios de los DSS y desafíos	56
4.2.3.	Tendencias Futuras en los DSS	56
4.3.	Áreas de aplicaciones de los DSS y las Soluciones Inteligentes	57
4.4.	Ejemplos y Casos de Estudio	59
4.4.1.	Aplicaciones de Ciudades Inteligentes en Asia	59
4.4.2.	Aplicaciones de Ciudades Inteligentes en Europa	60
4.4.3.	Aplicaciones de Ciudades Inteligentes en América del Norte	61
4.4.4.	Aplicaciones de Ciudades Inteligentes en América Latina	61
5.	Revisión de Soluciones Informáticas para la Gestión Integral de Infraestructuras y Servicios Inteligentes	63
5.1.	Soluciones informáticas para la gestión	63
5.2.	Tecnología FIWARE: Una Plataforma para el Desarrollo de Aplicaciones Inteligentes	65
5.2.1.	Principios y Objetivos de FIWARE	66
5.2.2.	Componentes Principales de FIWARE	67
5.2.3.	Beneficios de FIWARE	71

5.2.4. Casos de Uso de Fiware	71
6. Sistema de gestión inteligente de puertos	76
6.1. Aplicaciones de Gestión Portuaria	76
6.2. Proyecto de I+D. SmartPort en Las Palmas de Gran Canaria	78
6.3. Entendiendo las Fuentes de Datos del Puerto Marítimo de Las Palmas de Gran Canaria	80
6.3.1. Datos Estáticos	80
6.3.2. Datos Dinámicos	80
6.4. Implementación de FIWARE en SmartPort	83
6.5. Generic Enablers Utilizados en SmartPort	84
6.5.1. Agente de Contexto de Orion	84
6.5.2. Cosmos	84
6.5.3. Cygnus	84
6.6. Arquitectura de Backend de SmartPort	84
6.7. Escalabilidad del back-end de SmartPort	88
6.7.1. El modelo MapReduce en Hadoop	90
6.7.2. Arquitectura Lambda	91
6.8. Análisis de Datos en SmartPort	94
6.8.1. Caracterización Histórica de Grandes Conjuntos de Datos	94
6.8.2. Análisis Estacional de la Salida de Datos de Sensores Marítimos	97
6.8.3. Análisis de Datos de Múltiples Sensores en SmartPort	101
6.9. Administrador de Alertas para Datos de Sensores en SmartPort	104
6.10. Visualización de Datos de Sensores a Través de la Aplicación de Internet Enriquecida SmartPort	106
6.10.1. Visualización 3D del Terreno e Instalaciones en SmartPort	106
6.10.2. Modelos Tridimensionales en SmartPort	111
6.10.3. Aplicación Nativa para Dispositivos Móviles	114
7. Sistema de Gestión Inteligente de Aguas	116
7.1. Casos de Estudio de Aplicaciones para la Gestión del Ciclo Integral del Agua	116
7.2. Presentando el <i>Geographic Information System for Water Management</i>	118
7.3. Métodos para Diseñar un GIS-WM Usando FOSS	121
7.3.1. Diseño del Modelo de Datos	122
7.3.2. Agregando Flexibilidad para los Digitalizadores: Bases de datos de Edición y Producción	126
7.3.3. Conexión con Sistemas Externos: Activos y Gestión Comercial	126
7.4. Validaciones de Redes de Agua: Asegurando la Integridad y Robustez	129
7.4.1. Categorización de las Validaciones de la Red Basadas en el Tiempo de Ejecución	132
7.4.2. Ejecución del proceso de validación	132

7.5. Simulación de Trazas de Agua	135
7.6. Navegando a Través de Datos Históricos: una Máquina del Tiempo SIG .	138
7.6.1. Recuperación de Datos Históricos	138
7.6.2. Restauración de Estados de Red Anteriores: Funcionalidad de Recuperación de un Punto en el Tiempo	140
7.6.3. Implementación del Sistema de Gestión Histórica con PostgreSQL y MongoDB	143
7.7. Cortes Inteligentes de Suministro	144
7.8. Pruebas y Rendimiento	148
7.8.1. Encuesta de Satisfacción Antes y Después de Implementar el Sistema	148
7.8.2. Rendimiento Técnico de la Herramienta Desarrollada	148
7.9. Aportes Generales y Beneficios del GIS-WM	149
7.10. SmartMetering como Herramienta Accesorio del GIS-WM	152
8. Conclusiones y Trabajo Futuro	156
8.1. Conclusiones	156
8.2. Discusión de los Resultados	158
8.3. Implicaciones Prácticas	159
8.4. Limitaciones de la Investigación	159
8.5. Trabajo Futuro	160
9. Conclusions and Future Work	162
9.1. Conclusions	162
9.2. Discussion of Results	164
9.3. Implications	164
9.4. Research Limitations	165
9.5. Future Work	165

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Ejemplo de salida de CGIS. Fuente (Tomlinson, 1974)	8
2.2. Ejemplo de salida de SYMAP. Fuente (Olaya, 2009)	10
2.3. Ejemplo de modelo de datos de cobertura para ArcInfo basado en POLYVRT	11
2.4. Interfaz de GRASS, en su versión 6.1	12
2.5. QGIS en su versión Las Palmas de G.C., lanzada en 2016	13
2.6. Componentes de los SIG	16
2.7. Ejemplo de un mapa en QGIS	19
2.8. Ejemplo de un mapa en CARTO. Elaboración propia	20
2.9. Mapa con elementos vectoriales. Elaboración propia	22
2.10. Mapa con un modelo digital del terreno ráster. Elaboración propia . . .	24
2.11. Ejemplo de representación de H3. Elaboración propia	28
2.12. Componentes principales de una IDE	38
2.13. Mapa que toma como fuente de información una servicio WMS de una IDE. Elaboración propia	38
3.1. Cuadro de mando para análisis de la criminalidad den Chicago. Elabora- ción propia	45
3.2. Mapa que muestra rutas de ballenas azules en el Pacífico. Elaboración propia	46
3.3. Mapa de calor que muestra las antenas de telefonía móvil en el planeta. Elaboración propia	48
3.4. CAGR previsto por sector. (Statista, 2023; MarketsandMarkets, 2023; Grand View Research, 2023; The Insight Partners, 2023; Mordor Intelligence, 2023)	51
5.1. Esquema de los componentes y arquitectura de FIWARE. (FIWARE, 2018)	68
6.1. Sensor Geonica 05106	81
6.2. Sensor Aandela 3791-3798	82
6.3. Arquitectura y flujo de la gestión de los datos estáticos	85
6.4. Arquitectura del back-end de SmartPort. (P. Fernández et al., 2016b) . .	86
6.5. Ejemplo de modelo 3D de un barco. (Pablo Fernández et al., 2017).	86
6.6. Esquema de la arquitectura para gestionar datos del AIS. (Pablo Fernández et al., 2017).	88

6.7. Esquema de la arquitectura Lambda	92
6.8. Ubicación de las boyas “León y Castillo” y “Reina Sofía” en Las Palmas de Gran Canaria (Pablo Fernández et al., 2016).	95
6.9. Lecturas de 2012 - 2015 de la altura del 10% de las olas más altas registradas por el mareógrafo Geonica en las boyas “Reina Sofía” y “León y Castillo” (Pablo Fernández et al., 2016).	95
6.10. Serie de datos del mareógrafo Geonica de ambas boyas, centrada en los días ‘7/1/2014’ - ‘7/3/2014’ (Pablo Fernández et al., 2016).	96
6.11. Altura promedio del 10% de las olas más altas registrada por el Mareógrafo Geonica en las boyas “Reina Sofía” y “León y Castillo”, agrupada por temporada para los años 2011 - 2015 (Pablo Fernández et al., 2016).	97
6.12. Distribución por cuartiles de la serie de datos de altura de las olas registrada por el Mareógrafo Geonica en la boya “León y Castillo”, agrupada por temporada y año (Pablo Fernández et al., 2016).	100
6.13. Distribución por cuartiles de la serie de datos de altura de las olas registrada por el Mareógrafo Geonica en la boya “Reina Sofía”, agrupada por temporada y año (Pablo Fernández et al., 2016).	100
6.14. Un barco cuyo ángulo entre su orientación y la dirección de la corriente es mayor de 45 grados (Pablo Fernández et al., 2016).	101
6.15. Grado de pertenencia para el riesgo (Pablo Fernández et al., 2016).	102
6.16. Grado de pertenencia para la altura de la ola (Pablo Fernández et al., 2016).	102
6.17. Grado de pertenencia para el período de la ola (Pablo Fernández et al., 2016).	103
6.18. Centro de notificaciones y alertas mostrado cuando los datos alcanzan un margen definido. (Pablo Fernández et al., 2017).	105
6.19. Centro de de gestión de alertas. (Pablo Fernández et al., 2017).	106
6.20. Vista general del puerto generado con 3GM.	107
6.21. Esquema de integración de G3M con el front-end SmartPort y mostrando el acceso a servicios en línea. (Pablo Fernández et al., 2016).	108
6.22. Batimetría combinada con la capa de ortofoto, ambas obtenidas mediante el protocolo Web Map Service (WMS). (Pablo Fernández et al., 2016).	109
6.23. Modelos 3D que muestran la posición actual de los buques, contenedores y grúas dentro del entorno portuario. (Pablo Fernández et al., 2018).	110
6.24. Paneles en 2D que muestran la posición de diferentes elementos en los alrededores del puerto.(Pablo Fernández et al., 2018).	111
6.25. Los widgets Head Up Display (HUD) en pantalla brindan control sobre la altitud de la cámara virtual. (Pablo Fernández et al., 2016)	112
6.26. Imagen de un modelo que representa una boya.(Pablo Fernández et al., 2018).	112
6.27. Imagen de un modelo que representa una estación meteorológica.(Pablo Fernández et al., 2018).	113

6.28. Versión nativa de SmartPort ejecutándose en una tablet.(Pablo Fernández et al., 2016).	114
7.1. Definición del proceso de diseño del modelo (Fernández Moniz et al., 2020).	122
7.2. Red de muestra mostrada en el cliente QGIS usando el modelo de datos personalizado (Fernández Moniz et al., 2020).	125
7.3. Arquitectura general del GIS-WM propuesto (Fernández Moniz et al., 2020).	127
7.4. Conexión de la base de datos del SIG con la gestión de activos (Oracle) y la gestión comercial (AS/400) (Fernández Moniz et al., 2020).	128
7.5. Categorización de restricciones detallada basada en la naturaleza de la validación (Fernández Moniz et al., 2020).	130
7.6. Dos ejemplos diferentes de restricciones topológicas: (a) ilustra la conexión adecuada de un elemento; en este caso, debe haber un elemento puntual en cada extremo de la tubería; (b) muestra una restricción geométrica que indica específicamente que un elemento de línea no puede compartir una ruta con otro elemento de línea (Fernández Moniz et al., 2020).	131
7.7. Flujo de trabajo de validación para realizar modificaciones en la red de agua.	133
7.8. Error mostrado en el visor de errores del plugin. Una tubería no está conectada a ningún elemento. La sugerencia específica a los digitalizadores que una tubería debe estar conectada a un elemento puntual y recuerda que una válvula de ventilación de aire no se considera un elemento puntual (P. Fernández et al., 2016a).	134
7.9. Flujo de trabajo de la simulación de trazado.	136
7.10. Resultado de la simulación de trazado usando válvulas cerradas como condición de parada visualizado en QGIS (Fernández Moniz et al., 2020).	137
7.11. Usuarios accediendo a diferentes vistas generadas para cada uno de ellos usando la fecha especificada por cada uno.	140
7.12. Selección de la <i>timestamp</i> desde una lista de operaciones usando el plugin proporcionado.	141
7.13. Comparaciones de tiempo de inserción y recuperación para bases de datos PostgreSQL, MongoDB y PostgreSQL con conexiones FDW a MongoDB.	143
7.14. Comparación de recuperación del sistema entre la implementación de gestión histórica utilizando solo bases de datos PostgreSQL y el sistema compuesto de PostgreSQL y MongoDB conectados por MongoDB FDW.	144
7.15. Cortes alternativos de suministro de agua por la misma tubería rota. Ambas opciones afectan a clientes con prioridad normal. Se prefiere la opción (b) a la opción (a) porque afecta a menos clientes (Fernández Moniz et al., 2020).	146
7.16. Definición de permisos (Fernández Moniz et al., 2020).	149
7.17. Costo por año al comparar el software GIS-WM y otro software con licencia en la empresa (Fernández Moniz et al., 2020).	151

7.18. Recuperación de datos del sensor con la aplicación Smartwater. Las líneas azules representan las tuberías de la red de agua (Fernández Moniz et al., 2020).	152
7.19. Arquitectura general que integra herramientas de medición inteligente. .	154
7.20. Visualización de una alarma de umbral de salinidad y el estado del sensor de la red a través de la aplicación web de agua inteligente SmartWater. .	155

ÍNDICE DE TABLAS

3.1. Proyecciones y crecimiento de diferentes sectores dentro de las TIG ordenadas de mayor a menor CAGR <i>Compound Annual Growth Rate</i> . Cifras en miles de millones de dólares. (Statista, 2023; MarketsandMarkets, 2023; Grand View Research, 2023; The Insight Partners, 2023; Mordor Intelligence, 2023)	50
6.1. Evolución de la acumulación de los datos en el tiempo según aumenta la red de sensores	89
6.2. Comparativa de tiempos entre diferentes sistemas	90
6.3. Comparativa de tiempos entre sistemas incluyendo Hadoop con la arquitectura Lambda	94
6.4. Mejora de tiempos (%) usando Hadoop con Lambda en lugar de Hadoop estándar	94
6.5. Altura promedio del 10 % de las olas más altas registradas por el Mareógrafo Geonica en la boya “León y Castillo”, agrupada por temporada y año (Pablo Fernández et al., 2016).	98
6.6. Altura promedio del 10 % de las olas más altas registradas por el Mareógrafo Geonica en la boya “Reina Sofía”, agrupada por temporada y año (Pablo Fernández et al., 2016).	99
7.1. Tasa de compresión en el nuevo modelo de datos (Fernández Moniz et al., 2020).	124
7.2. Ejemplo simplificado de una tabla de datos históricos. Observe el uso de rangos de fechas para determinar en qué período de tiempo la fila es válida.142	
7.3. Resultados de la encuesta (Fernández Moniz et al., 2020).	150

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DE LA TESIS

1.1. Contexto y Justificación

En la era de la información, la gestión y el análisis de datos geoespaciales han adquirido una importancia crítica en múltiples disciplinas, desde la planificación urbana y la gestión de recursos hasta la investigación científica y la respuesta a emergencias. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y en un sentido más amplio, las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG), han emergido como herramientas fundamentales en este contexto, facilitando la integración, análisis y visualización de datos geoespaciales de manera que permite tomar decisiones informadas y precisas.

El desarrollo y avance de TIG han permitido a los investigadores y profesionales gestionar grandes volúmenes de datos geoespaciales de manera más eficiente y efectiva. Las TIG han revolucionado la forma en las que se resuelven los problemas con el componente geoespacial.

En la actualidad, se dispone de una amplia gama de soluciones tecnológicas que, fundamentadas en las TIG, han transformado diversos aspectos de la vida de la población. Estas soluciones abarcan desde aplicaciones de geolocalización que optimizan el transporte y la logística, hasta sistemas de geomarketing que permiten una segmentación más precisa del mercado. Asimismo, las TIG juegan un papel crucial en entornos críticos como respuesta ante emergencias, suministro de electricidad y agua, telecomunicaciones entre otros. Estas aplicaciones no solo reflejan la versatilidad de las TIG, sino también su impacto en la mejora de la calidad de vida y la eficiencia operativa en múltiples sectores.

Esta tesis explora la gestión y visualización de grandes volúmenes de datos geoespaciales, integrando los Sistemas de Información Geográfica con tecnologías avanzadas como el Big Data y la computación en la nube. Desarrolla metodologías para mejorar la toma de decisiones en infraestructuras críticas, como puertos y redes de agua, mediante la visualización y análisis en tiempo real de datos complejos, ofreciendo soluciones más eficientes y sostenibles. La validación en entornos reales destaca el impacto positivo de estos sistemas en la optimización operativa y la gestión de recursos.

1.2. Hipótesis de Trabajo

Nuestra hipótesis de trabajo se basa en considerar que el uso eficiente de procesos geográficos e informáticos para acceder, almacenar, actualizar y analizar datos de diversa naturaleza, provenientes de sensores reales sobre el terreno, de fuentes estáticas, o de resultados de simulaciones. Todo dentro del marco de los volúmenes masivos de información, que permite gestionar y analizar estos datos para facilitar la toma de decisiones mediante sistemas de apoyo a la decisión o *Decision Support Systems* (DSS) usando sistemas de información geográfica. Siendo en su combinación aplicaciones que no se limiten a mostrar datos sino que además se les provee de la capacidad para asistir la toma de decisiones; aquí es donde aparecen las aplicaciones inteligentes o *smart*.

Esta hipótesis se basa en el la búsqueda de propuestas de arquitecturas de software enfocadas a la mejora en la gestión y el trabajo eficiente de grandes volúmenes de datos geográficos como fuente de información para sistemas de apoyo a la toma de decisiones.

1.3. Objetivos

El objetivo de esta tesis es la búsqueda de nuevos métodos de gestión eficientes de grandes volúmenes de datos mediante SIG que permitan el soporte a la toma de decisiones informadas y eficaces. Para lograr esto, se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Desarrollar Aplicativos SIG para el Apoyo de la Toma de Decisiones
 - Implementar soluciones que permitan a los usuarios tomar decisiones informadas utilizando Sistemas de Información Geográfica.
 - Desarrollar aplicaciones que integren datos geoespaciales y herramientas de análisis para proporcionar una visión clara y concisa de la información crítica.
2. Mejorar Técnicas y Arquitecturas de Trabajo con Datos Geográficos
 - Investigar y desarrollar mejoras en las técnicas y arquitecturas existentes para la gestión y análisis de datos geográficos.
 - Optimizar procesos y desarrollar nuevas metodologías para manejar grandes volúmenes de datos geoespaciales.
3. Explotación de Datos Mediante Data Science
 - Aplicar técnicas de Data Science para realizar análisis predictivos y desarrollar nuevas soluciones en entornos inteligentes.
 - Utilizar algoritmos avanzados de análisis y modelado predictivo para proporcionar información útil y accionable a los usuarios.
4. Optimización de Latencias en Análisis y Geoprocesamiento
 - Buscar optimizaciones en las latencias de los análisis y geoprocesamiento de datos bajo las exigentes escalabilidades de los sistemas informáticos.

- Investigar y desarrollar técnicas para reducir los tiempos de respuesta y mejorar la eficiencia del procesamiento de datos geoespaciales.
5. Visualización en Entornos Tridimensionales y Multiplataforma
 - Desarrollar soluciones para la visualización de datos en entornos multidimensionales y multiplataforma.
 - Facilitar la interacción de los usuarios con los datos de manera más intuitiva y efectiva.
 6. Aplicabilidad a Casos Reales de Empresas y Administraciones
 - Transferir los resultados de la investigación y desarrollo a casos reales de empresas y administraciones locales y nacionales.
 - Implementar las soluciones desarrolladas en la tesis en entornos reales, demostrando su aplicabilidad y beneficios prácticos.

1.4. Contribuciones de la tesis

Las contribuciones de la tesis en publicaciones y congresos, tales como (P. Fernández et al., 2016a), (Pablo Fernández et al., 2016), (Pablo Fernández et al., 2017), (Pablo Fernández et al., 2018) y (Fernández Moniz et al., 2020). La tesis ha generado un marco metodológico para la implementación de sistemas inteligentes de apoyo a la toma de decisiones basados en SIG, el cual ha sido expuesto en diversas publicaciones científicas, así como en proyectos de Investigación y Desarrollo (I+D). Este marco, que integra tecnologías como Big Data, la computación en la nube y la Inteligencia Artificial, ha sido validado en contextos reales, y sus resultados han sido compartidos con la comunidad académica.

Además, algunas de las metodologías y aplicaciones desarrolladas, como el sistema de gestión inteligente de puertos (SmartPort) y el sistema para la gestión del ciclo integral del agua, han sido presentados en congresos, demostrando el impacto de estas soluciones en la optimización de recursos y la sostenibilidad. Los casos prácticos que abordan el uso de SIG en la gestión de infraestructuras críticas han servido como ejemplos sólidos de transferencia de conocimiento y aplicación en proyectos ejecutados con éxito.

Las contribuciones científicas de esta tesis no solo abarcan el desarrollo teórico y metodológico, sino también su difusión y validación a través de publicaciones y congresos, fortaleciendo su impacto en el campo del análisis y gestión de datos geoespaciales.

1.5. Metodología

En esta sección describimos la metodología empleada en la investigación para el análisis y procesamiento de grandes volúmenes de datos georreferenciados mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica y aplicaciones inteligentes. La metodología

se estructuró en varias fases, abarcando desde la recolección de datos hasta el análisis y la validación de los resultados obtenidos.

1.5.1. Diseño de la Investigación

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo y cualitativo, utilizando métodos tanto exploratorios como confirmatorios. El enfoque cuantitativo permitió analizar grandes volúmenes de datos y extraer patrones significativos, mientras que el enfoque cualitativo facilitó la comprensión de fenómenos complejos y su interpretación en contextos específicos.

Fases de la Investigación

Las fases de la investigación se estructuraron de la siguiente manera:

1. **Revisión de la Literatura:** Se realizó una revisión exhaustiva de la literatura existente para identificar las brechas en el conocimiento y establecer el marco teórico de la investigación. Este análisis permitió definir las bases conceptuales y metodológicas para la integración de SIG con tecnologías emergentes como el Big Data y la computación en la nube.
2. **Recolección de Datos:** La recolección de datos se llevó a cabo a través de diferentes fuentes, incluyendo sensores remotos, bases de datos existentes y simulaciones computacionales.
3. **Desarrollo de Herramientas:** Se diseñaron y desarrollaron herramientas específicas para la integración y análisis de datos geospaciales en entornos SIG. Estas herramientas incluyeron aplicaciones de software personalizadas que permiten el procesamiento en tiempo real y la visualización multidimensional de los datos.
4. **Análisis de Datos:** Los datos recolectados fueron analizados utilizando técnicas avanzadas de análisis espacial y modelado predictivo. Se aplicaron algoritmos para identificar patrones y generar modelos predictivos que pudieran ser utilizados en la toma de decisiones.
5. **Validación de Resultados:** Los resultados obtenidos fueron validados mediante análisis de rendimiento sobre las arquitecturas planteadas, además de su aplicación en casos reales, como la gestión inteligente de puertos y el ciclo integral del agua. Se realizaron pruebas de campo y simulaciones para evaluar la efectividad de los sistemas desarrollados.

1.5.2. Herramientas y Tecnologías Utilizadas

Durante la investigación usaron las siguientes herramientas y tecnologías:

1. **Software de SIG:** Se utilizó principalmente QGIS para el procesamiento y análisis de los datos geospaciales. Esta herramienta permitió la manipulación de grandes volúmenes de datos y la generación de mapas y visualizaciones interactivos.

2. Bases de datos: Se implementó PostgreSQL con su extensión PostGIS para el almacenamiento y recuperación eficiente de datos geoespaciales. Esta base de datos con la capacidad de manejo de datos geoespaciales permitió gestionar grandes volúmenes de datos de manera efectiva. También usamos Hadoop, MongoDB, MySQL entre otras.
3. Tecnologías de computación en la nube: Se emplearon servicios en la nube para el almacenamiento y procesamiento de los datos recolectados, lo que facilitó el acceso remoto y la escalabilidad de las soluciones desarrolladas mediante servicios de datos.
4. Herramientas de análisis y modelado: Se utilizaron algoritmos de aprendizaje automático y técnicas estadísticas avanzadas para el análisis de datos y la creación de modelos. Estas herramientas fueron fundamentales para identificar patrones y tendencias en los datos geoespaciales.

1.5.3. Estrategias de Validación

La validación de los resultados fue un componente crucial en la metodología utilizada. Las estrategias de validación incluyeron:

1. Pruebas de campo: Se realizaron pruebas de campo para validar la precisión y efectividad de los modelos desarrollados. Estas pruebas permitieron verificar la aplicabilidad de las herramientas en situaciones reales.
2. Simulaciones: Se llevaron a cabo simulaciones computacionales para evaluar el desempeño de las herramientas desarrolladas en diferentes escenarios. Las simulaciones ayudaron a identificar posibles mejoras y ajustes necesarios en los modelos.
3. Aplicación en proyectos reales: Las metodologías y herramientas desarrolladas fueron aplicadas en proyectos reales, como la gestión de infraestructuras, para validar su aplicabilidad y beneficios en situaciones prácticas.

1.5.4. Limitaciones de la Metodología

Aunque la metodología utilizada permitió alcanzar los objetivos de la investigación, existen algunas limitaciones que deben ser consideradas:

1. Dependencia de datos: La calidad de los resultados depende de la precisión y disponibilidad de los datos utilizados. Limitaciones en la calidad de los datos pueden afectar la validez de los resultados obtenidos.
2. Complejidad en el desarrollo de herramientas: El desarrollo de herramientas avanzadas para el análisis y visualización de datos requiere recursos técnicos y conocimientos especializados, lo que puede limitar su implementación en algunos contextos.
3. Escalabilidad: A pesar de la implementación de soluciones escalables y es uno de los elementos analizados, la gestión de grandes volúmenes de datos puede

representar un desafío en términos de tiempo de procesamiento y recursos de almacenamiento.

1.6. Estructura de la Tesis

Esta tesis se estructura en ocho capítulos, cada uno de los cuales aborda diferentes aspectos del desarrollo y aplicación de los SIG en el contexto de la gestión de grandes volúmenes de datos geoespaciales. El primer capítulo, que corresponde al presente texto, introduce la investigación y define sus objetivos. Los capítulos 2 y 3 abordan las bases conceptuales, el estado del arte, el contexto y la proyección de las Tecnologías de Información Geográfica. Los capítulos 4 y 5 se enfocan en los sistemas de apoyo a la toma de decisiones.

El capítulo 6 presenta el sistema de gestión inteligente de puertos, describiendo arquitecturas para la gestión de datos provenientes de sensores, así como métodos de análisis de datos y sistemas de apoyo a la toma de decisiones. Por su parte, el capítulo 7 aborda el sistema de gestión inteligente de aguas, detallando arquitecturas para la gestión de datos hidráulicos y los métodos empleados en el desarrollo de herramientas inteligentes de apoyo a la toma de decisiones aplicados al sector de la gestión de aguas. Finalmente, el capítulo 8 recoge las conclusiones de la tesis y plantea las líneas de trabajo futuro.

TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG), es un término que abarca diversos campos incluyendo los Sistemas de Información Geográfica (SIG), las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE), entre otros.

En la era de la información, el manejo y análisis de datos espaciales han adquirido una importancia crítica en múltiples disciplinas, desde la planificación urbana y la gestión de recursos hasta la investigación científica y la respuesta a emergencias. Los Sistemas de Información Geográfica han emergido como herramientas fundamentales en este contexto, facilitando la integración, análisis y visualización de datos geoespaciales de manera que permite tomar decisiones más informadas y precisas. Este capítulo ofrece una visión sobre la evolución histórica de los SIG, destacando sus desarrollos clave, avances tecnológicos y metodológicos, así como algunos fundamentos dentro de este amplio sector.

2.1. Primeros Avances en Cartografía y Datos Espaciales

El desarrollo de los SIG no se originó en el siglo XX; sus raíces se pueden rastrear hasta el siglo XIX, cuando la cartografía y la representación visual de datos espaciales comenzaron a consolidarse como herramientas de análisis.

Uno de los primeros ejemplos de uso analítico de mapas para la comprensión de fenómenos sociales y ambientales es el trabajo de John Snow durante la epidemia de cólera en Londres en 1854. Snow utilizó un mapa para trazar la distribución de casos de cólera, lo que le permitió identificar la fuente del brote; una bomba de agua contaminada, y de este modo, demostrar en análisis de la información geográfica podía ayudar a resolver problemas, en este caso, de salud pública (Snow, 1855).

Este estudio pionero sentó las bases para el uso analítico de datos espaciales, aunque el concepto de SIG en sí aún estaba lejos de materializarse.

A finales del siglo XIX y principios del siglo XX, se realizaron importantes avances en la cartografía y el análisis espacial, en parte gracias a la introducción de técnicas más sofisticadas. Sin embargo, la capacidad para almacenar, procesar y analizar y visualizar

datos espaciales de manera eficiente, especialmente desde una perspectiva masiva, no fue posible hasta la llegada de la era digital.

2.1.1. La Era Digital y el Surgimiento de los SIG

Trabajos desarrollados como John K Wright en la Sociedad Geográfica Americana, concretamente, tras la publicación de su obra *Elements of Cartography* en 1953, marcó un hito en los SIG (Olaya, 2009). Aunque el verdadero punto de inflexión en el desarrollo de los SIG se produjo en la década de 1960, cuando la tecnología de computación comenzó a transformar la forma en que se gestionaba la información geoespacial. El Canada Geographic Information System (CGIS), desarrollado por Roger Tomlinson y su equipo, marcó un hito crucial al ser el primer sistema digital diseñado para almacenar, analizar y visualizar datos geoespaciales (Tomlinson, 2007). El CGIS permitió a los usuarios realizar análisis complejos, como la evaluación de la idoneidad de terrenos para diferentes usos, y estableció el marco para futuros desarrollos en la tecnología SIG. En la Figura 2.1 puede verse un ejemplo de una salida de este SIG.

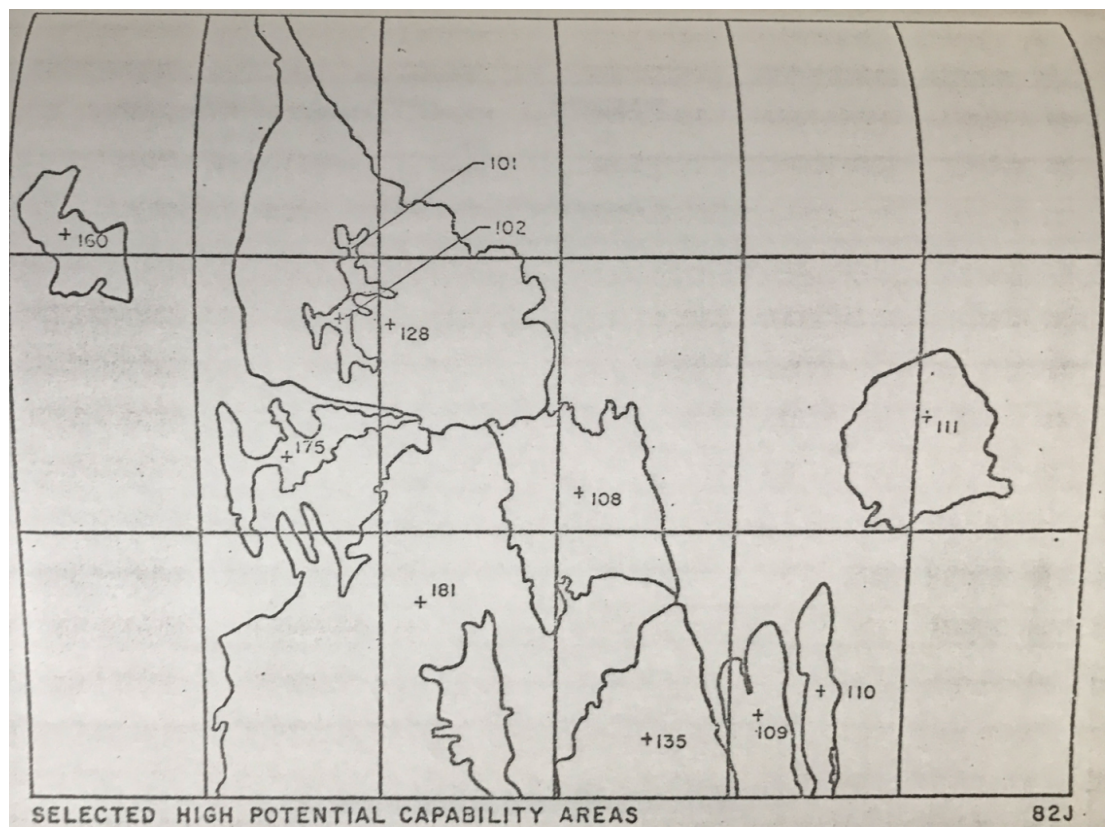


Figura 2.1: Ejemplo de salida de CGIS. Fuente (Tomlinson, 1974)

En paralelo al desarrollo del CGIS, se realizaron importantes avances en la teoría y la práctica de los SIG. La introducción del concepto de información geográfica y la formalización de los principios de los SIG en la década de 1980 sentaron las bases para la evolución de esta tecnología (Miller, 2020). Durante este período, el campo de los SIG comenzó a consolidarse como una disciplina académica y profesional, con la aparición

de software especializado y la formación de comunidades de usuarios y desarrolladores.

A su vez, el Harvard Laboratory for Computer Graphics and Spatial Analysis, establecido en la Universidad de Harvard en 1965, se distinguió como un epicentro de innovación en el campo de los SIG. Bajo la dirección de Howard T. Fisher, el laboratorio no solo promovió avances significativos en la cartografía digital, sino que también sentó las bases para el análisis espacial moderno mediante el uso de tecnologías computacionales emergentes.

Una de las principales contribuciones del laboratorio fue el desarrollo del sistema SYMAP (Synagraphic Mapping System), uno de los primeros sistemas de mapeo computarizado. SYMAP representó un avance revolucionario al permitir la generación automatizada de mapas a partir de datos geográficos y estadísticos, en una época donde la cartografía se realizaba manualmente. Este sistema utilizaba algoritmos de interpolación para convertir datos puntuales en superficies continuas, lo que facilitaba la creación de contornos y otras formas de representación espacial. Además, SYMAP podía producir diversos tipos de mapas temáticos, como mapas de densidad de puntos, mapas de coropletas y mapas de isopletas, lo que permitía una visualización más efectiva de patrones y tendencias en los datos.

La capacidad de SYMAP para integrar y visualizar datos de manera eficiente lo hizo valioso en múltiples disciplinas. En geografía, permitió una mejor comprensión de la distribución espacial de diversos fenómenos. En la planificación urbana, facilitó la toma de decisiones informadas al visualizar datos demográficos y de infraestructura. En epidemiología, ayudó a rastrear la propagación de enfermedades, mientras que en ecología, permitió el análisis de patrones ambientales. Estas aplicaciones demostraron el potencial transformador de la cartografía computarizada y sentaron las bases para el desarrollo futuro de los SIG. En la Figura 2.2 puede verse un ejemplo de una salida de este SIG.

2.1.2. Avances Tecnológicos y Expansión de Aplicaciones

La década de 1980 y 1990 fue testigo de una rápida expansión en las capacidades tecnológicas de los SIG. La incorporación de tecnologías emergentes, como el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y la teledetección, permitió una recolección de datos geoespaciales con una precisión y cobertura sin precedentes (Kaplan et al., 2017). La combinación de datos GPS con imágenes satelitales proporcionó a los SIG una capacidad mejorada para monitorear y analizar la superficie terrestre, facilitando aplicaciones en áreas como la gestión de recursos naturales, la planificación urbana y el monitoreo ambiental.

La década de 1980 fue testigo de importantes avances tecnológicos que impulsaron el desarrollo de los SIG. La llegada de las computadoras personales y la mejora en la capacidad de procesamiento de datos permitieron que los SIG se convirtieran en herramientas más accesibles y eficientes. Con la proliferación de microcomputadoras, estos sistemas comenzaron a ser adoptados por una gama más amplia de usuarios.

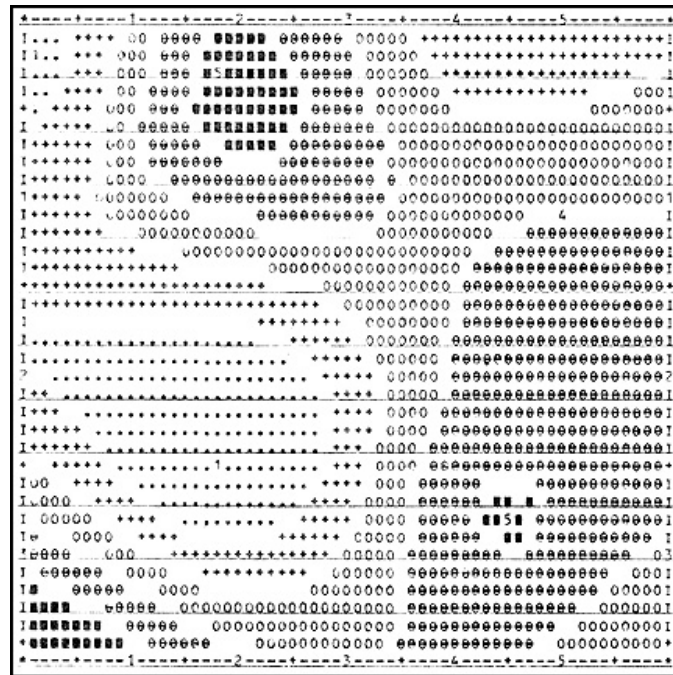


Figura 2.2: Ejemplo de salida de SYMAP. Fuente (Olaya, 2009)

En paralelo, entidades gubernamentales desarrollaron sus propios proyectos internos, como fue GRASS GIS, que fue desarrollado inicialmente por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos en el Centro de Ingeniería y Desarrollo de la Construcción (CERL) a principios de los años 80. Fue diseñado para proporcionar herramientas de análisis geoespacial y gestión de datos geográficos para aplicaciones militares y civiles.

Uno de los hitos más importantes de esta época fue el lanzamiento de ArcInfo en 1982 por Environmental Systems Research Institute (ESRI). ArcInfo fue uno de los primeros SIG comerciales que ofrecía capacidades avanzadas de análisis espacial y gestión de datos geográficos. Este software estableció un estándar en la industria y abrió la puerta a la integración de SIG en proyectos de planificación y gestión territorial. En la Figura 2.3, podemos ver un diagrama que ilustra el modelo de datos de cobertura desarrollado por Scott Morehouse para el sistema de información geográfica ESRI ArcInfo a principios de la década de 1980. Se basó en el modelo POLYVRT anterior desarrollado en la Universidad de Harvard.

ArcInfo consistía en un conjunto de programas escritos en FORTRAN, que se accedían a través de una interfaz de línea de comandos. Esta estructura basada en comandos permitía a los usuarios realizar el desarrollo de bases de datos geográficas, geoprocésamiento y funciones de salida. Con el tiempo, ESRI añadió subsistemas adicionales para el procesamiento de superficies, análisis de redes y procesamiento de datos topográficos.

Una de las innovaciones significativas de ArcInfo fue la introducción del Lenguaje de Macro de ARC (AML), que permitió la automatización de comandos y la creación de interfaces gráficas simples para herramientas y aplicaciones específicas. Esto facilitó la expansión del uso de ArcInfo en diversas plataformas, incluyendo Unix y Windows.

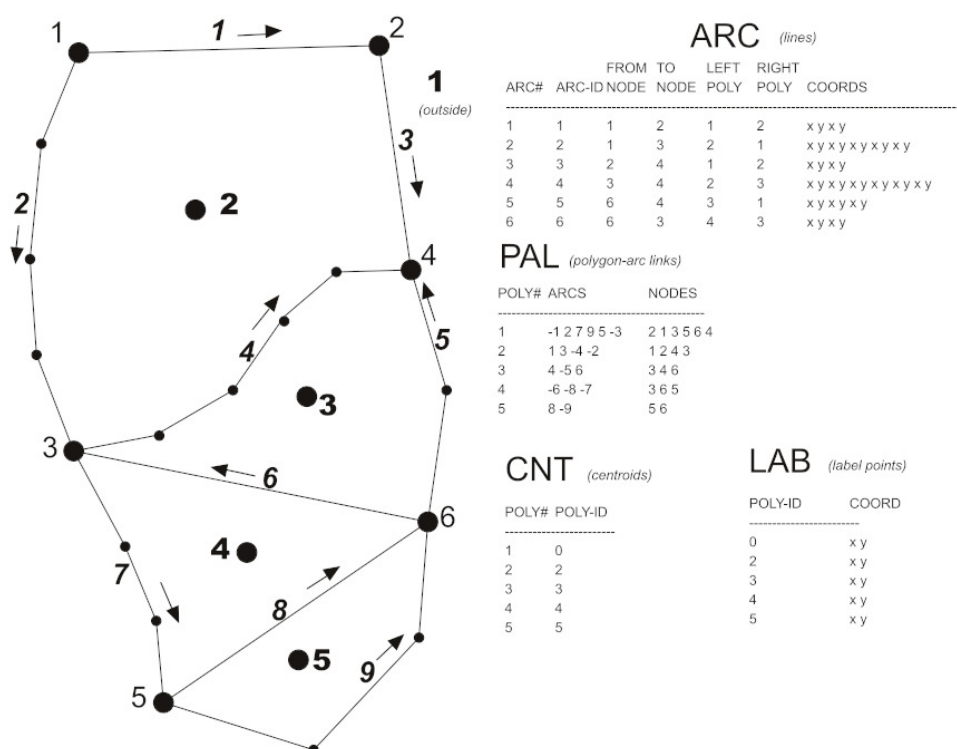


Figura 2.3: Ejemplo de modelo de datos de cobertura para ArcInfo basado en POLYVRT

A medida que la tecnología informática avanzaba, ESRI continuó mejorando ArcInfo. La plataforma se trasladó a Sun Solaris en la versión 5.0 y a Windows en la versión 7.1. En 1987, ESRI lanzó una versión de ARC/INFO para MS-DOS y posteriormente para Windows, lo que hizo que la herramienta fuera accesible a un mayor número de usuarios y organizaciones.

En 1999, ESRI lanzó ArcGIS 8.0, marcando una importante evolución en su familia de productos SIG. Con esta versión, ArcInfo fue discontinuado y su base de código fue congelada. ArcGIS se convirtió en una arquitectura de múltiples escalas, con productos de escritorio disponibles en tres niveles de licencia: ArcView, ArcEditor y ArcInfo. ArcInfo se presentó como la opción de "GIS profesional", ofreciendo la mayor flexibilidad y control en la construcción de datos, modelado, análisis y visualización de mapas.

En el mismo año, 1999, GRASS GIS se liberó bajo la Licencia Pública General de GNU (GPL) (GRASS, 2024), convirtiéndose en una plataforma de código abierto. Esto permitió a la comunidad de usuarios y desarrolladores colaborar en su mejora y expansión. GRASS GIS se destacó por su robustez y capacidad para manejar grandes conjuntos de datos geoespaciales y realizar análisis complejos. En la Figura 2.4 puede verse una captura de GRASS, en su versión 6.1, lanzada en el año 2006.

Además esa misma década, vio una mayor integración y normalización de datos geográficos, lo que facilitó la interoperabilidad entre diferentes sistemas y aplicaciones. La creación de estándares como el formato Shapefile por ESRI permitió el intercambio

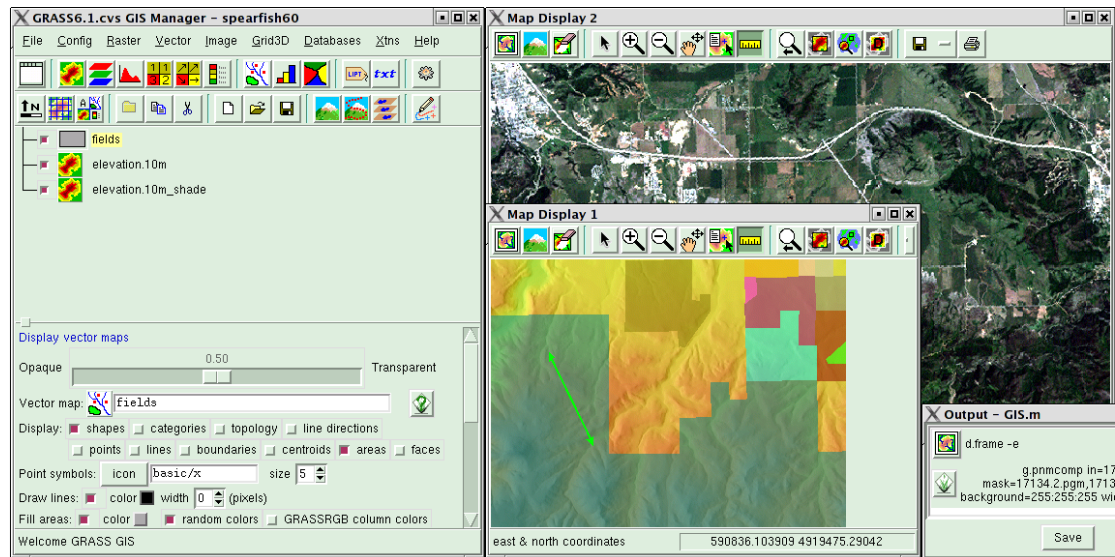


Figura 2.4: Interfaz de GRASS, en su versión 6.1

de datos geoespaciales entre diferentes plataformas y programas, promoviendo una mayor colaboración y eficiencia, unido a la creación de las primeras Infraestructuras de Datos Espaciales (IDEs).

Cabe destacar el desarrollo de tecnologías de teledetección, como los satélites Landsat y el uso de sistemas de posicionamiento global que permitió la recopilación de datos geoespaciales de alta resolución y precisión. Estos avances mejoraron significativamente la capacidad de los SIG para mapear y analizar el entorno natural y construido.

2.1.3. La Era del Big Data y la Integración con Tecnologías Emergentes

El siglo XXI ha traído consigo un nuevo conjunto de desafíos y oportunidades para los SIG, impulsado por la proliferación de grandes volúmenes de datos, conocidos como big data. La integración de SIG con tecnologías de big data ha permitido el análisis y la visualización de conjuntos de datos masivos, proporcionando una base sólida para el desarrollo de modelos predictivos y la toma de decisiones basada en datos (Michael F Goodchild et al., 2012a). Los algoritmos avanzados de análisis espacial y la modelización predictiva han permitido a los SIG abordar problemas más complejos y ofrecer informes más detallados y precisos en tiempo real.

La década de los 2000 vio la evolución de software SIG más potente y accesible. ESRI lanzó ArcGIS 8 en 1999, que introdujo una arquitectura escalable y una interfaz gráfica de usuario (GUI) más amigable. Este software permitió a los usuarios realizar análisis espaciales complejos y crear mapas interactivos con mayor facilidad. La integración de ArcGIS con herramientas de modelado espacial y análisis estadístico amplió las capacidades de los SIG, facilitando su uso en aplicaciones más avanzadas.

El auge de las plataformas de SIG basadas en la web fue otro hito importante de esta década. Servicios como Google Maps, lanzado en 2004 y Google Earth, lanzado en 2005, democratizaron el acceso a datos geoespaciales y herramientas de mapeo.

Estas plataformas permitieron a los usuarios visualizar y explorar datos geográficos de manera interactiva, fomentando una mayor conciencia y comprensión del entorno espacial.

La comunidad de código abierto también contribuyó significativamente al desarrollo de los SIG durante los años 2000. Proyectos como QGIS que se pueden ver en la Figura 2.5 o gvSIG y el continuo desarrollo de GRASS GIS, proporcionaron alternativas robustas y gratuitas al software propietario, fomentando la innovación y colaboración entre desarrolladores y usuarios. La naturaleza de código abierto de estas plataformas permitió la personalización y expansión de las funcionalidades de SIG, adaptándolas a una variedad de necesidades específicas.



Figura 2.5: QGIS en su versión Las Palmas de G.C., lanzada en 2016

La integración del trabajo de datos geoespaciales con otras tecnologías emergentes desde su génesis, como los sistemas de información basados en la nube y las redes móviles, también marcó esta década. La capacidad de almacenar y procesar grandes volúmenes de datos geoespaciales en la nube permitió un acceso más rápido y eficiente a la información, mejorando la colaboración y el análisis en tiempo real. Las aplicaciones móviles basadas en SIG facilitaron la recolección de datos en campo y su integración inmediata con sistemas centrales, mejorando la eficiencia y precisión de las operaciones en terreno.

En el ámbito de la investigación, los SIG se consolidaron como una herramienta indispensable para el análisis espacial en una amplia gama de disciplinas, desde la geografía y la biología hasta la economía y la sociología. La capacidad de los SIG para integrar y analizar datos espaciales y temporales permitió a los investigadores abordar problemas complejos de una manera más holística y detallada.

Además, la integración de SIG con tecnologías emergentes como la inteligencia artificial (IA) y el aprendizaje automático está transformando la forma en que se realizan los análisis espaciales.

La IA permite la automatización de procesos y la generación de modelos predictivos

más sofisticados, mejorando la capacidad de los SIG para anticipar futuros escenarios y optimizar la toma de decisiones (Pouyanfar et al., 2018). La combinación de SIG con técnicas de análisis avanzado está abriendo nuevas posibilidades para la investigación y la gestión de problemas complejos en un mundo cada vez más interconectado.

La evolución de los SIG ha estado intrínsecamente ligada a los avances en el campo de las bases de datos. Los SIG modernos se basan en conceptos y tecnologías desarrollados en el ámbito de las bases de datos tradicionales, aunque han evolucionado para abordar las particularidades de los datos espaciales.

2.1.4. Los SIG y las Bases de Datos

Las bases de datos tradicionales, o relacionales, se centran en el almacenamiento y la gestión de datos estructurados en tablas que se relacionan entre sí a través de claves primarias y foráneas. Edgar Codd, uno de los pioneros en este campo, introdujo el modelo relacional en su artículo en 1970, sentando las bases para los sistemas de gestión de bases de datos relacionales (E. F. Codd, 1970). Los Sistemas de Gestión de Bases de Datos Relacionales (SGBR) permiten la manipulación eficiente de datos mediante el uso de consultas SQL y proporcionan mecanismos robustos para la integridad y consistencia de los datos (Date, 1977), algunos ejemplos de SGBR son MySQL, PostgreSQL y Oracle.

A diferencia de las bases de datos tradicionales, las bases de datos geográficas están diseñadas para manejar datos geoespaciales. Estas bases de datos integran la capacidad de almacenar, consultar y analizar información que incluye coordenadas geográficas, geometrías y relaciones espaciales (McMaster et al., 2010). Los SIG utilizan estas bases de datos para gestionar datos como mapas, capas temáticas y modelos de elevación digital.

Ejemplos de sistemas de gestión de bases de datos espaciales incluyen PostGIS, una extensión espacial para PostgreSQL, y Oracle Spatial, una opción integrada en Oracle Database. Esta capacidad de las bases de datos geográficas ya no solo permite almacenar los datos geoespaciales, sino que además permite realizar operaciones espaciales avanzadas. Mientras que las bases de datos relacionales están optimizadas para consultas basadas en atributos y relaciones, las bases de datos geográficas proporcionan funciones específicas para realizar análisis espaciales, como la intersección de polígonos, la consulta de proximidad y la manipulación de geometrías (Longley et al., 2015).

En la práctica, hay una delgada línea entre los SIG y las bases de datos, ya que las propias extensiones de las bases de datos permiten realizar todo tipo de tareas con los datos geográficos, limitando la visualización y creación de cartografía al SIG. Además, muchos SIG a menudo integran bases de datos tradicionales y geográficas para aprovechar lo mejor de ambos mundos. La combinación permite gestionar y almacenar datos espaciales junto con datos alfanuméricos en un entorno de base de datos relacional, facilitando la realización de consultas complejas y el análisis espacial (Bartelme, 2012). Esta integración es esencial para aplicaciones como por ejemplo la planificación urbana, donde es necesario gestionar tanto la información geográfica (como el uso del suelo)

como los datos atributivos (como la densidad de población).

En conclusión, la evolución de los Sistemas de Información Geográfica ha sido una historia de innovación y transformación, desde los primeros mapas analíticos del siglo XIX hasta las sofisticadas plataformas digitales actuales. La comprensión de esta evolución proporciona una base sólida para apreciar el impacto actual y futuro de los SIG en una variedad de disciplinas y aplicaciones. A medida que el campo continúa avanzando, es esencial seguir explorando y desarrollando nuevas tecnologías y metodologías que puedan aprovechar el potencial completo de los SIG para enfrentar los retos del siglo XXI.

2.2. Componentes de los Sistemas de Información Geográfica

Los Sistemas de Información Geográfica están compuestos por varios componentes clave que trabajan juntos para capturar, almacenar, analizar, gestionar y presentar datos geoespaciales. Estos componentes pueden dividirse en hardware, software, datos y personal.

1. Hardware

- Computadoras y Servidores: Las computadoras de escritorio y portátiles son esenciales para los usuarios de SIG, mientras que los servidores robustos son necesarios para manejar y procesar grandes volúmenes de datos.
- Dispositivos de Entrada y Salida: Escáneres para digitalizar mapas, dispositivos GPS para recolectar datos geoespaciales en campo, y plotters para imprimir mapas de alta resolución son algunos ejemplos de hardware.

2. Software

- Aplicaciones SIG: Programas como ArcGIS, QGIS y MapInfo proporcionan herramientas para la creación, edición, análisis y visualización de datos geográficos. Estas aplicaciones permiten realizar análisis espaciales avanzados y generar mapas interactivos.
- Sistemas de Gestión de Bases de Datos (SGBD): Los SGBD, como PostgreSQL con PostGIS, Oracle con su extensión Spatial son utilizados para almacenar y gestionar datos geoespaciales. Facilitan la consulta, recuperación y análisis eficiente de información.
- Herramientas de Análisis: Software especializado como por ejemplo, para el análisis de redes, modelado espacial y simulaciones, que permiten a los usuarios realizar estudios complejos y específicos para diferentes áreas.
- Tipos de datos (hablaremos con más en detalle sobre esto en 2.4.1).

Datos Raster: Incluyen imágenes satelitales, fotografías aéreas y datos de sensores remotos. Estos datos son esenciales para el análisis de coberturas terrestres, monitoreo ambiental y estudios de cambio climático.

Datos Vectoriales: Comprenden puntos, líneas y polígonos que representan características geográficas específicas como ubicaciones de interés, redes

de transporte y límites administrativos.

- **Metadatos:** Información sobre los datos (como la fuente, precisión, fecha de recolección, etc.) que es crucial para evaluar la calidad y adecuación de los datos para determinados análisis.

- **Procedimientos**

Recolección de Datos: Métodos de campo, como el uso de GPS y encuestas, y técnicas de teledetección para recolectar datos geospaciales precisos.

Procesamiento de Datos: Incluye la limpieza, transformación y conversión de datos en formatos utilizables por el software SIG. Esto puede involucrar la georreferenciación de mapas y la creación de bases de datos relacionales.

Análisis y Modelado: Procedimientos para el análisis espacial, incluyendo superposición de capas, análisis de proximidad, y modelado de fenómenos geográficos.

3. Personal

- **Analistas SIG:** Profesionales que utilizan herramientas de SIG para realizar análisis espaciales y producir mapas y reportes.
- **Técnicos en SIG:** Responsables de la recolección, procesamiento y mantenimiento de datos geospaciales.
- **Administradores de Sistemas:** Gestionan la infraestructura de hardware y software, asegurando la operatividad y eficiencia del SIG.
- **Desarrolladores SIG:** Son responsables de desarrollar nuevas funcionalidades específicas y/o customizadas sobre el SIG.

En la Figura 2.6 puede verse un esquema de los componentes de los SIG.



Figura 2.6: Componentes de los SIG

2.3. SaaS versus no-SaaS dentro de los SIG

El SaaS (Software as a Service) es un modelo de distribución de software en el que el software se aloja en servidores de un proveedor y se pone a disposición de los clientes a través de Internet. Los usuarios pueden acceder y utilizar el software mediante un navegador web, o accediendo via *Application Programming Interface* (API), sin necesidad de instalar o mantener hardware y software en sus propias instalaciones, ejemplos de esto son ArcGIS online, Google Earth engine, o CARTO.

Mientras un software de escritorio, o tradicional, es una aplicación de software que se instala directamente en el disco duro de un ordenador y se ejecuta localmente en ese dispositivo. Estos programas suelen diseñarse para sistemas operativos específicos, como Windows, macOS o Linux, y requieren un proceso de instalación que involucra la descarga de un archivo de instalación y su ejecución para instalar los componentes necesarios en el sistema, ejemplos de estos son ArcGIS, QGIS o gvSIG.

La diferencia entre los Sistemas de Información Geográfica de escritorio y los SIG ofrecidos como Software as a Service (SaaS) radica en varios aspectos fundamentales, incluyendo su implementación, accesibilidad, costo, mantenimiento, y escalabilidad. A continuación, se desarrollan estas diferencias en detalle:

2.3.1. Implementación y Accesibilidad

SIG de Escritorio: Los SIG de escritorio, son aplicaciones instaladas localmente en una computadora. Requieren que el software se descargue e instale en el hardware del usuario, lo que puede incluir computadoras de escritorio, portátiles o estaciones de trabajo especializadas. Estos sistemas están diseñados para aprovechar al máximo el hardware local, permitiendo un procesamiento rápido y eficiente de grandes volúmenes de datos geoespaciales. Sin embargo, la accesibilidad está limitada al dispositivo en el que se instala el software, lo que significa que los usuarios necesitan tener acceso a esa máquina para trabajar con el SIG.

SIG como SaaS: Los SIG SaaS están basados en la nube y se accede a ellos a través de un navegador web. Esto elimina la necesidad de instalar software en una computadora local. La principal ventaja de los SIG SaaS es su accesibilidad desde cualquier dispositivo con conexión a Internet, ya sea una computadora de escritorio, portátil, tablet o smartphone. Esto permite a los usuarios acceder y trabajar con sus datos geoespaciales desde cualquier lugar y en cualquier momento.

2.3.2. Coste económico

SIG de Escritorio: El costo de los SIG de escritorio puede ser significativo, ya que generalmente incluyen una licencia de software que debe ser comprada por adelantado y de una sola vez para una versión concreta. Aunque, pueden haber costos adicionales por actualizaciones, soporte técnico y mantenimiento del hardware necesario. Este modelo de costo suele ser más adecuado para organizaciones con presupuestos más grandes y

necesidades específicas que justifiquen la inversión inicial.

SIG como SaaS: Los SIG SaaS suelen operar bajo un modelo de suscripción, donde los usuarios pagan una tarifa mensual o anual por acceder al software. Esto puede incluir diferentes niveles de servicio y almacenamiento, dependiendo de las necesidades del usuario. Este modelo de pago por uso puede ser más accesible para pequeñas empresas, startups y organizaciones con presupuestos limitados, ya que permite escalar el costo según el uso real del servicio.

2.3.3. Mantenimiento y Actualizaciones

SIG de Escritorio: El mantenimiento y las actualizaciones de los SIG de escritorio son responsabilidad del usuario o de la organización que utiliza el software. Esto incluye instalar nuevas versiones, parches de seguridad y solucionar problemas técnicos. El usuario debe estar atento a las actualizaciones y gestionar cualquier incompatibilidad que pueda surgir con el hardware o el sistema operativo.

SIG como SaaS: En el modelo SaaS, el proveedor del servicio se encarga del mantenimiento, actualizaciones y seguridad del software. Los usuarios siempre tienen acceso a la última versión del software sin necesidad de gestionar las actualizaciones manualmente. Esto reduce significativamente la carga de trabajo del usuario en términos de mantenimiento y garantiza que siempre se disponga de las últimas funciones y mejoras de seguridad.

2.3.4. Escalabilidad

La escalabilidad en software se refiere a la capacidad de un sistema para manejar un aumento en la carga de trabajo o en la demanda sin comprometer su rendimiento. Esto puede implicar adaptar el software para funcionar eficientemente con más usuarios, datos o transacciones, ya sea mediante mejoras en la infraestructura, el código o ambos.

SIG de Escritorio: La escalabilidad de los SIG de escritorio puede ser limitada por el hardware disponible. El procesamiento de grandes volúmenes de datos geoespaciales puede requerir computadoras con especificaciones técnicas avanzadas, lo cual puede ser costoso. Además, la adición de nuevos usuarios puede requerir la compra de más licencias de software y equipos adicionales.

SIG como SaaS: Los SIG SaaS son altamente escalables, ya que están basados en la nube y pueden aprovechar la infraestructura flexible y robusta de los proveedores de servicios en la nube. Los usuarios pueden aumentar su capacidad de almacenamiento y procesamiento según sea necesario, sin preocuparse por las limitaciones del hardware. Además, agregar nuevos usuarios es sencillo y se puede gestionar mediante la asignación de roles y permisos dentro del mismo entorno de servicio.

2.3.5. Integración y Colaboración

La integración se refiere a la capacidad de diferentes sistemas o aplicaciones para trabajar juntos, intercambiando datos y funciones de manera efectiva. La colaboración

implica la capacidad de múltiples usuarios o equipos para trabajar conjuntamente en tareas o proyectos, facilitando la comunicación y el intercambio de información en tiempo real.

SIG de Escritorio: La colaboración en proyectos de SIG de escritorio puede ser más compleja, ya que implica compartir archivos y datos entre diferentes máquinas. Esto puede requerir la utilización de redes locales, discos duros externos o servicios de almacenamiento en la nube para transferir datos, lo que puede no ser tan eficiente.

SIG como SaaS: Los SIG SaaS están diseñados para facilitar la colaboración en tiempo real. Los usuarios pueden compartir proyectos, mapas y datos geoespaciales de manera instantánea a través de la plataforma en la nube. Esto permite una colaboración más fluida y eficiente, ya que varios usuarios pueden trabajar simultáneamente en el mismo proyecto desde diferentes ubicaciones geográficas.

2.3.6. Ejemplos de Uso

SIG de Escritorio: Son ideales para proyectos que requieren un alto nivel de personalización, análisis complejos y uso intensivo de recursos. Se utilizan comúnmente en sectores como la planificación urbana, gestión de recursos naturales, investigación científica y análisis de infraestructuras.

SIG como SaaS: Son más adecuados para aplicaciones que requieren flexibilidad, accesibilidad y colaboración. Se utilizan en sectores como la educación, gestión de emergencias, marketing geoespacial, y cualquier otro campo que beneficie de la capacidad de compartir y acceder a datos en tiempo real desde múltiples ubicaciones.

En la Figura 2.7 puede verse un ejemplo visual de un mapa en QGIS (escritorio), mientras en la Figura 2.8 vemos un ejemplo de CARTO (SaaS).

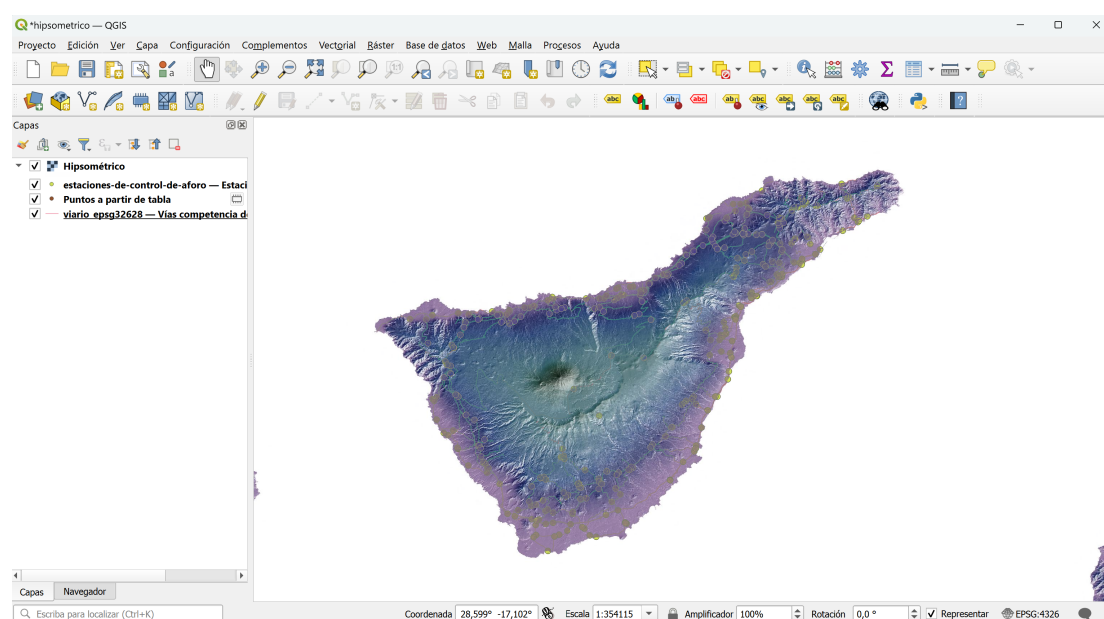


Figura 2.7: Ejemplo de un mapa en QGIS

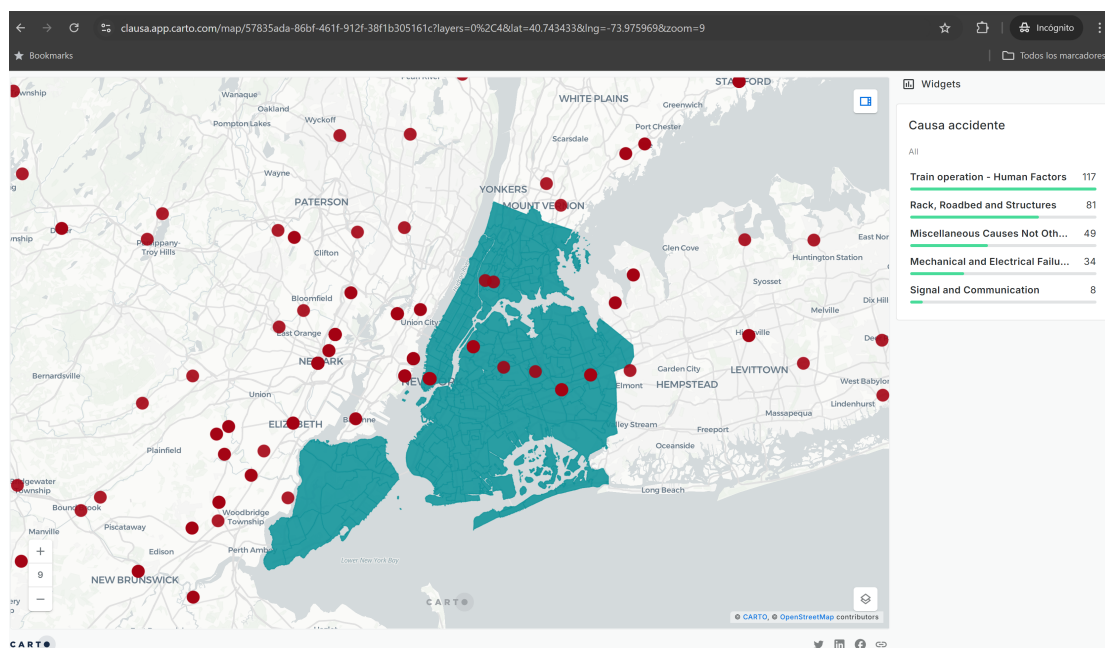


Figura 2.8: Ejemplo de un mapa en CARTO. Elaboración propia

2.4. Datos e información en los SIG

La diferencia entre datos e información es fundamental y se relaciona directamente con el valor y la utilidad que se extraen de ellos. Aquí hay una explicación de cada término y cómo se aplican en el contexto de las Tecnologías de la Información Geográfica:

1. **Datos:** Los datos son hechos crudos, observaciones o medidas que aún no han sido procesadas o analizadas para extraer significado. En el contexto de las TIG, los datos pueden ser cualquier tipo de información geoespacial, como coordenadas geográficas, atributos de puntos de interés, límites de áreas, imágenes satelitales, etc. Por sí solos, los datos son solo puntos aislados de información y carecen de contexto o relevancia inmediata.
2. **Información:** La información surge cuando los datos se organizan, estructuran o se les da un contexto que permite entender su significado. La información implica dar sentido a los datos, interpretarlos y transformarlos en conocimiento útil. En el contexto de las TIG, la información se obtiene mediante la visualización, análisis y modelado de datos geoespaciales para entender patrones, relaciones y tendencias en el espacio geográfico. La información geográfica puede incluir mapas, tablas, gráficos, informes y modelos que comunican conclusiones y hallazgos derivados del análisis de datos geoespaciales.

2.4.1. Tipos de datos en los SIG

Esta sección presenta una visión exhaustiva de los diversos tipos de datos en los SIG, incluyendo datos vectoriales, datos raster, datos de atributos, datos temporales, y otros tipos de datos especializados. Además, se exploran las aplicaciones y consideraciones específicas para cada tipo de dato.

Datos Vectoriales

Los datos vectoriales constituyen una representación de las características geográficas mediante geometrías precisas como puntos, líneas y polígonos. Este tipo de datos es particularmente adecuado para modelar elementos discretos y bien definidos en el espacio, permitiendo una representación detallada de las características geográficas que requieren una delimitación exacta y clara. La precisión en la representación de las geometrías vectoriales facilita un análisis espacial exacto y es fundamental para aplicaciones que requieren alta resolución en la representación de datos geoespaciales.

1. **Geometría de tipo Punto:** Los puntos son la forma más elemental de datos vectoriales, utilizados para representar ubicaciones discretas y específicas en el espacio geográfico. Su simplicidad permite una representación directa de elementos únicos como postes de electricidad, pozos de agua, o puntos de muestreo en estudios ambientales. Cada punto se define por una única coordenada

en un sistema de referencia espacial, lo que lo convierte en una herramienta clave para la localización precisa y el análisis de datos geospaciales (DeMers, 2008).

2. Geometría de tipo Línea: Las líneas, a diferencia de los puntos, representan entidades lineales que poseen longitud pero carecen de un ancho definido. Ejemplos de datos lineales incluyen carreteras, ríos y líneas de costa. Las líneas se construyen a partir de una secuencia de vértices conectados, y cada segmento lineal entre dos vértices se define por sus coordenadas espaciales. Esta representación es crucial para la modelización de redes de transporte y cuerpos de agua, así como para la integración en sistemas de análisis de redes (DeMers, 2008).
3. Geometría de tipo Polígono: Los polígonos se emplean para representar áreas cerradas que tienen extensión tanto en longitud como en ancho. Estos elementos son fundamentales para modelar características espaciales como lagos, parcelas de tierra y zonas urbanas. Cada polígono se define por una serie de vértices que delinean su perímetro, y el área dentro de este perímetro se clasifica según la característica que representa, como áreas residenciales, comerciales o agrícolas. La capacidad de modelar áreas completas permite un análisis exhaustivo del uso del suelo y la planificación territorial (Longley et al., 2015).

En la Figura 2.9 se puede ver un ejemplo de una cartografía con los tres elementos vectoriales, siendo los puntos las estaciones de control de aforo, las líneas las carreteras y los polígonos los municipios.

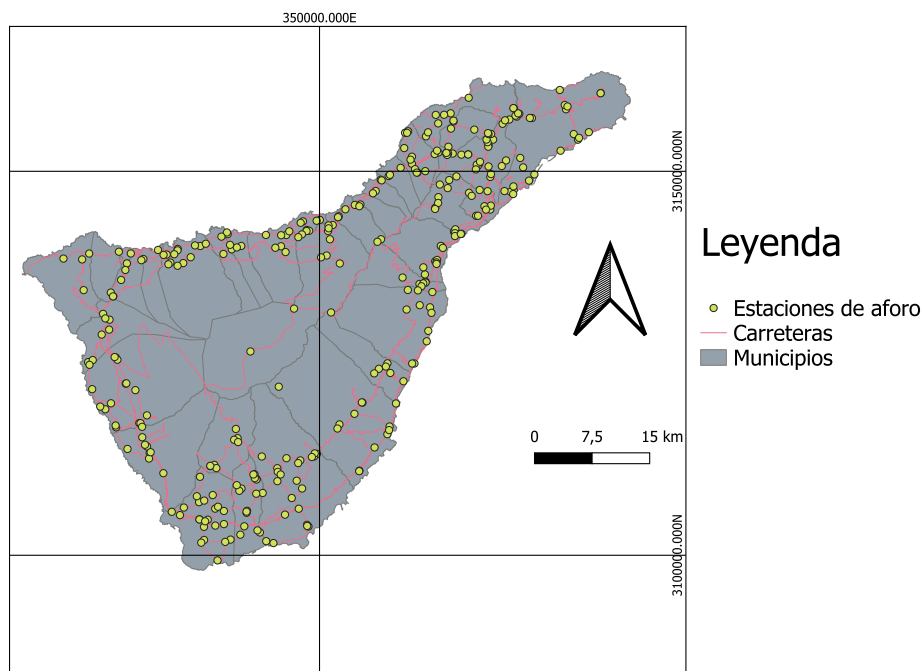


Figura 2.9: Mapa con elementos vectoriales. Elaboración propia

Datos Ráster

Los datos ráster son una representación espacial basada en una matriz regular de celdas o píxeles, donde cada celda almacena un valor que puede representar una variedad de atributos, como la elevación, la temperatura, la humedad del suelo, o la intensidad de la reflectancia en una banda espectral específica. Este tipo de datos es especialmente adecuado para modelar fenómenos continuos o variables que cambian gradualmente en el espacio, proporcionando una visión detallada y continua del paisaje geográfico. Los datos ráster son fundamentales para aplicaciones en las que se requiere una representación continua del espacio geográfico y una resolución espacial uniforme. A continuación mencionamos algunas características del formato ráster.

1. Resolución espacial: La resolución espacial de un ráster se refiere al tamaño de cada celda en el mundo real, generalmente expresada en unidades lineales como metros o kilómetros. Una alta resolución implica celdas pequeñas que pueden capturar detalles finos del paisaje, mientras que una baja resolución implica celdas más grandes que representan áreas más extensas pero con menor detalle. La resolución es un factor clave en la elección de datos ráster, ya que determina la precisión y el nivel de detalle del análisis geoespacial (Longley et al., 2015).
2. Resolución espectral: En el caso de los datos provenientes de imágenes satelitales, podemos encontrar los datos ráster multispectrales, que están compuestos por múltiples bandas, cada una capturando reflectancias en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético. Estas bandas pueden combinarse para resaltar diferentes características del paisaje, como la vegetación, el agua, o el suelo desnudo. El análisis multispectral es crucial para estudios de teledetección, monitoreo ambiental y clasificación de la cobertura del suelo.
3. Análisis de datos ráster: Los datos ráster son ideales para el análisis espacial cuantitativo, permitiendo operaciones como la superposición de capas, la clasificación de terrenos, y el cálculo de estadísticas zonales. A través de técnicas como la reclasificación, el análisis de distancias, o el modelado de superficies, es posible derivar información valiosa para la toma de decisiones en áreas como la gestión de recursos naturales, la planificación urbana, y la mitigación de desastres naturales (DeMers, 2008).
4. Modelado de superficies: Los rústeres pueden utilizarse para representar superficies continuas, como Modelos Digitales de Elevación (MDE), que son fundamentales para el análisis del terreno, la hidrología y la modelización de flujos. Los MDE permiten calcular pendientes, orientaciones, y áreas de acumulación, proporcionando información esencial para el análisis geográfico y la simulación ambiental (Longley et al., 2015).

En la Figura 2.10 se puede observar un ejemplo de un modelo digital del terreno, basado en datos LiDAR, tipo de dato que explicaremos más adelante. Ilustra cómo los valores de elevación se distribuyen en una cuadrícula ráster, destacando las variaciones

topográficas del terreno.

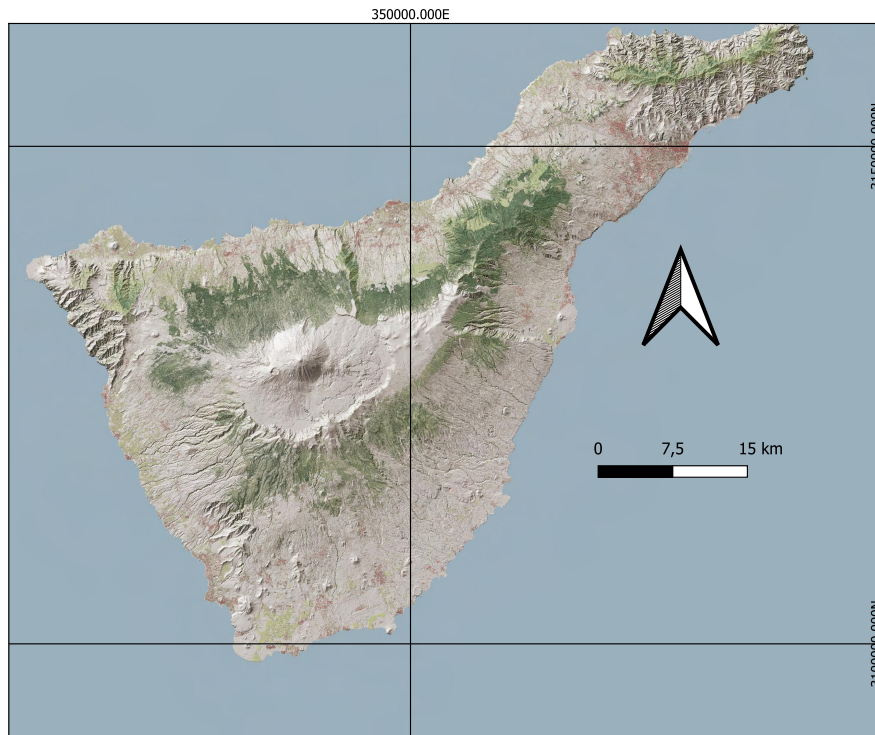


Figura 2.10: Mapa con un modelo digital del terreno ráster. Elaboración propia

2.4.2. Datos Alfanuméricos o Temáticos

Los datos alfanuméricos, también conocidos como datos de atributos, consisten en información no geoespacial, ya sean vectoriales o ráster. Estos datos añaden una capa de detalle esencial para la comprensión completa de las características representadas en un sistema de información geográfica. Mientras que los datos espaciales proporcionan la dimensión geométrica y localización de los elementos, los datos de atributos alfanuméricos ofrecen contexto adicional sobre estas características, permitiendo un análisis más detallado y significativo (Pérez Alcántara, 2021).

1. **Atributos Nominales:** Los atributos nominales son datos categóricos que no poseen un orden intrínseco entre sus categorías. Estos datos se utilizan para clasificar y etiquetar las entidades sin implicar una jerarquía o secuencia. Ejemplos de atributos nominales incluyen el nombre de una calle, el tipo de vegetación en una área específica, o la clasificación de tipos de suelo. La principal característica de los atributos nominales es que las categorías son mutuamente exclusivas y no tienen una relación de mayor o menor entre ellas. Esta categorización es fundamental para clasificar y diferenciar entidades dentro de un SIG (DeMers, 2008).

2. **Atributos Ordinales:** Los atributos ordinales representan datos categóricos que tienen un orden jerárquico o secuencial entre las categorías. Estos datos permiten clasificar las entidades en una serie que refleja un nivel de importancia o calidad. Por ejemplo, en la evaluación de la calidad del agua, las categorías pueden ir desde excelente hasta pobre, indicando una gradación en la calidad. De manera similar, las zonas de riesgo sísmico pueden clasificarse en niveles como bajo, moderado y alto, reflejando diferentes grados de riesgo. Los atributos ordinales son útiles para el análisis comparativo y para establecer prioridades en la planificación y gestión.
3. **Atributos Cuantitativos:** Los atributos cuantitativos son datos numéricos que pueden ser medidos y analizados en términos absolutos o relativos. Estos datos proporcionan una medida precisa de las características de las entidades espaciales, como la población de una ciudad, la precipitación anual en una región o la elevación del terreno en un punto específico. La naturaleza numérica de los atributos cuantitativos permite realizar cálculos estadísticos y análisis matemáticos que son fundamentales para la modelización espacial y la toma de decisiones basada en datos .
4. **Datos Temporales:** Los datos temporales son aquellos que capturan y representan cambios en las características espaciales a lo largo del tiempo. Este tipo de datos es fundamental para el análisis de tendencias y la modelización de fenómenos dinámicos, ya que permite observar cómo evolucionan los elementos y las condiciones geográficas con el paso del tiempo. En un sistema de información geográfica, los datos temporales permiten la integración de una dimensión temporal con la espacial, facilitando un análisis más completo y profundo de los fenómenos geoespaciales (Cressie et al., 2015).

El análisis de datos temporales es crucial en diversas aplicaciones, tales como el monitoreo ambiental, la planificación urbana, y la gestión de recursos naturales, donde la variabilidad en el tiempo puede influir significativamente en la interpretación de los datos y en la toma de decisiones. La capacidad de rastrear y analizar estas variaciones temporales ofrece una perspectiva dinámica sobre los procesos espaciales y ayuda en la predicción de tendencias futuras.

- **Series Temporales:** Las series temporales consisten en secuencias de datos recolectados en intervalos de tiempo regulares. Estos datos permiten observar la evolución de una variable o fenómeno a lo largo del tiempo y son fundamentales para el análisis de tendencias y patrones temporales. Un ejemplo común de series temporales en el contexto geoespacial podría ser la medición de temperaturas diarias en una estación meteorológica, la evolución del nivel del agua en un embalse o el cambio en la cobertura del suelo capturado por imágenes satelitales. El análisis de series temporales permite a los investigadores identificar ciclos estacionales, tendencias a largo plazo y anomalías temporales, y es una herramienta clave para la predicción y la planificación (Chatfield et al., 2019). Las técnicas estadísticas aplicadas a las series temporales incluyen el análisis de suavización, la descomposición en componentes estacionales y de tendencia, y el modelado de

series temporales para hacer pronósticos futuros.

- Datos Espacio-Temporales: Los datos espacio-temporales o en cuatro dimensiones, teniendo en cuenta coordenadas X,Y, altura (o Z) y el tiempo, integran información espacial y temporal para representar cómo los fenómenos cambian no solo en el espacio, sino también en el tiempo. Estos datos son esenciales para modelar y analizar fenómenos que tienen una dinámica compleja y que varían en ambos dominios. Un ejemplo es el seguimiento del crecimiento urbano, donde se analizan tanto la expansión de áreas construidas como los cambios en la densidad de población a lo largo de varios años. Los datos espacio-temporales son utilizados en la gestión de emergencias, la planificación del transporte, y la evaluación de impactos ambientales, proporcionando una visión holística de cómo los eventos y procesos espaciales evolucionan con el tiempo (Michael F Goodchild, 2013). La integración y análisis de datos espacio-temporales requieren técnicas avanzadas de modelización y visualización para gestionar la complejidad de las interacciones entre los componentes espaciales y temporales.

- Datos de Intervalo de Tiempo: Los datos de intervalo de tiempo se refieren a datos recogidos en puntos específicos de tiempo, que son analizados para estudiar el comportamiento de fenómenos en esos intervalos. Este tipo de datos es útil para el análisis de eventos discretos y para evaluar el impacto de intervenciones o cambios en el entorno. Por ejemplo, se puede analizar el efecto de una nueva política de uso del suelo sobre el crecimiento urbano mediante la comparación de datos antes y después de la implementación de la política.

El análisis de datos de intervalo de tiempo ayuda a comprender los efectos inmediatos y las respuestas a cambios o eventos específicos, y es crucial para la evaluación de políticas y la planificación (Haining, 2003). Las técnicas utilizadas para analizar estos datos incluyen el análisis de impacto y la comparación de series temporales pre y post-evento.

2.5. Otros Tipos de Datos Especializados

Además de los tipos de datos más comunes, destacamos los siguientes:

1. Datos de Redes: Los datos de redes representan sistemas interconectados mediante una estructura compuesta por nodos y aristas, que modelan la conectividad y el flujo dentro de la red. Estos datos son fundamentales para analizar y gestionar sistemas como redes de transporte, redes de servicios públicos y redes de comunicaciones. En un sistema de información geográfica, los datos de redes permiten modelar cómo los elementos de una red se interrelacionan y facilitan el análisis del flujo de recursos o personas a través de la red. La representación de redes incluye no solo los componentes estructurales como nodos y aristas, sino también características operacionales como capacidades de flujo y tiempos de viaje, que son cruciales para la optimización y planificación de infraestructuras.

Los modelos de redes se utilizan en una variedad de aplicaciones, incluyendo la optimización de rutas en sistemas de transporte, la gestión de redes eléctricas y de agua, y la planificación de redes de telecomunicaciones. La capacidad para simular y analizar redes en un SIG permite a los planificadores y gestores tomar decisiones informadas sobre la expansión y el mantenimiento de estas redes.

2. Datos 3D: Los datos tridimensionales (3D) proporcionan una representación detallada de las características geográficas con profundidad, lo que permite modelar la topografía del terreno, la infraestructura subterránea y los edificios de manera más realista. La representación en 3D mejora la comprensión espacial al permitir la visualización de datos en su contexto tridimensional, facilitando el análisis de la relación entre diferentes elementos espaciales y sus interacciones. En aplicaciones como la planificación urbana, los datos 3D permiten a los urbanistas visualizar el impacto de nuevos desarrollos en el contexto del paisaje existente. En geología y ingeniería civil, los datos 3D son esenciales para el modelado del subsuelo y la evaluación de riesgos asociados con la construcción. Estos datos se generan a partir de técnicas como la fotogrametría aérea, la modelización de superficies y el análisis de nubes de puntos LiDAR.
3. Datos LiDAR: El LiDAR (Light Detection and Ranging) es una tecnología de escaneo láser que utiliza pulsos de luz para medir distancias con alta precisión, generando modelos detallados de la superficie terrestre. Los datos LiDAR proporcionan una visión precisa de la topografía y son útiles para aplicaciones topográficas, forestales y urbanas. La capacidad del LiDAR para penetrar la vegetación y capturar detalles del terreno subyacente hace que sea una herramienta valiosa para la elaboración de mapas topográficos detallados, la gestión de bosques y la planificación de la infraestructura urbana. Los modelos LiDAR permiten la identificación de características del terreno con alta resolución, facilitando el análisis de la elevación, la detección de cambios en la cobertura del suelo y la evaluación de riesgos naturales como inundaciones y deslizamientos de tierra (Wehr et al., 1999).
4. Datos de Sensores Remotos: Los datos de sensores remotos se obtienen a través de dispositivos ubicados en satélites, aviones o drones que capturan información sobre la superficie terrestre desde una perspectiva aérea. Estos datos son cruciales para el monitoreo ambiental, la agricultura de precisión, la gestión de recursos naturales y la cartografía. Los sensores remotos capturan una variedad de información espectral y espacial, que se utiliza para evaluar características como la cobertura del suelo, la salud de los cultivos y la extensión de los cuerpos de agua. La capacidad para recopilar datos a gran escala y en intervalos regulares permite un monitoreo continuo y una respuesta rápida a cambios ambientales. Las imágenes de sensores remotos son fundamentales para la gestión del cambio climático, la planificación territorial y la evaluación de desastres naturales (Jensen, 2009).
5. Datos de Crowdsourcing: Los datos de crowdsourcing provienen de la información geográfica generada por usuarios a través de plataformas colaborativas como

OpenStreetMap. Este tipo de datos complementa las fuentes oficiales al permitir una actualización rápida y continua de la información geoespacial. La participación comunitaria en la recopilación de datos facilita la incorporación de detalles locales y actualizaciones frecuentes, que pueden ser críticos para aplicaciones en áreas de rápido cambio o en regiones con información limitada. El crowdsourcing en SIG permite a los usuarios contribuir con datos sobre carreteras, edificios y otros elementos geoespaciales, mejorando la precisión y la cobertura de los mapas. Esta información es valiosa para la planificación urbana, la respuesta a emergencias y la creación de mapas detallados y actualizados.

6. Índices Espaciales

- a) H3: H3 es un sistema de indexación geoespacial basado en una estructura jerárquica de hexágonos desarrollado por Uber. Este sistema facilita la representación y análisis de datos espaciales mediante una estructura eficiente para operaciones geoespaciales (Uber, 2018). H3 ofrece alta precisión y eficiencia en el análisis espacial, siendo compatible con grandes volúmenes de datos y escalable para aplicaciones globales. Sin embargo, su implementación puede ser compleja y requiere conocimientos específicos, y puede ser más desafiante integrarlo con ciertos sistemas SIG tradicionales (Uber, 2018).

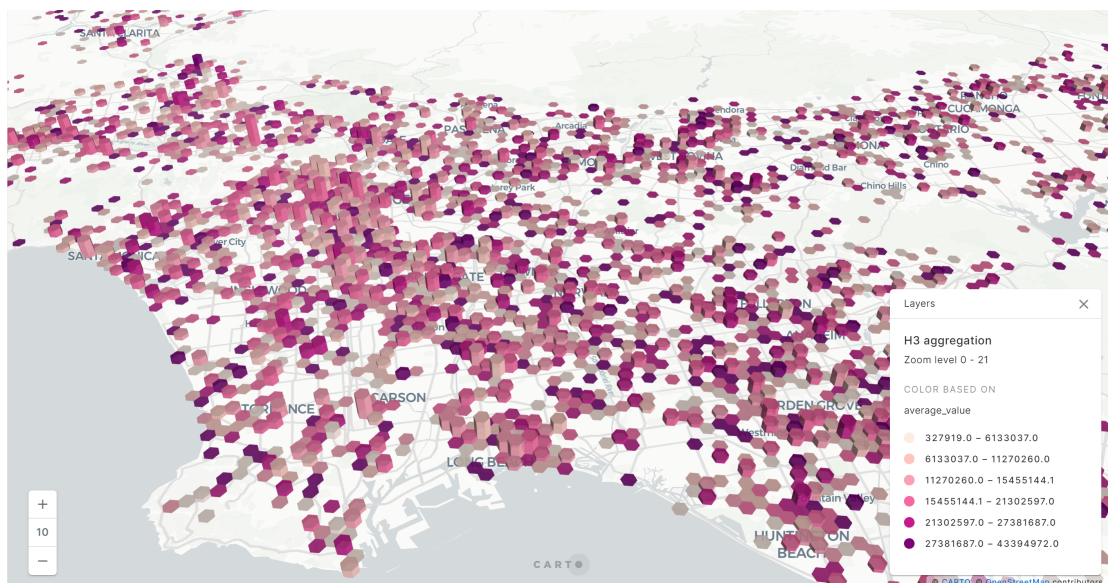


Figura 2.11: Ejemplo de H3

- b) Quadrees y R-trees: Los Quadrees son estructuras jerárquicas utilizadas para indexar datos espaciales en dos dimensiones, dividiendo el espacio en cuadrantes que pueden subdividirse recursivamente. Son eficaces para consultas que requieren particiones espaciales, como la búsqueda de vecinos cercanos (Samet, 1984).

Los R-trees generalizan los Quadrees para soportar dimensiones arbitrarias y geometrías complejas, organizando los datos en una estructura de árbol balanceado. Son útiles para indexar y recuperar datos basados en ubicación

espacial, como la búsqueda de intersecciones y selección de objetos dentro de rangos de coordenadas.

Ambas estructuras permiten búsquedas eficientes y rápidas, soportan consultas complejas y son escalables. Sin embargo, requieren mantenimiento para garantizar la eficiencia y pueden tener un rendimiento subóptimo para conjuntos de datos extremadamente dispersos o densos.

Existen otros índices espaciales como los KD-trees, que dividen el espacio multidimensional mediante un árbol binario, y el Grid Index, que divide el espacio en celdas uniformes. Estos índices están diseñados para diferentes tipos de consultas y estructuras de datos geoespaciales.

2.6. Formatos Físicos más Comunes en los SIG

Los Sistemas de Información Geográfica gestionan una amplia gama de datos geoespaciales que se almacenan y procesan en diversos formatos de archivo. La elección del formato adecuado es fundamental para asegurar la compatibilidad, eficiencia y precisión en el manejo de estos datos. Este capítulo examina los formatos más comunes utilizados en los SIG, abordando sus características, ventajas y limitaciones, así como las bases de datos geoespaciales y los índices espaciales.

Dentro de los SIG destacamos los siguientes formatos:

1. Shapefile (.shp): El formato Shapefile es uno de los más tradicionales y ampliamente utilizados en los SIG para almacenar datos geoespaciales vectoriales. Un Shapefile se compone de un conjunto de archivos interrelacionados, de los cuales los más cruciales son el archivo .shp (que almacena la geometría), el .shx (índice de geometría) y el .dbf (atributos), entre otros. Esta estructura facilita el almacenamiento y manipulación de datos espaciales básicos, como puntos, líneas y polígonos (Mooney et al., 2023).

Entre sus principales ventajas se encuentran su amplia compatibilidad con diversos software SIG y su facilidad de uso para edición y análisis de datos. Sin embargo, el Shapefile presenta limitaciones significativas, como la falta de soporte para estructuras de datos complejas, como la topología, y la gestión de grandes volúmenes de datos debido a su naturaleza basada en archivos individuales.

2. GeoJSON (.geojson): GeoJSON es un formato basado en JSON diseñado para representar datos geoespaciales mediante texto plano. Su popularidad ha crecido debido a su integración fluida con aplicaciones web y su legibilidad. GeoJSON permite la representación de datos espaciales en estructuras jerárquicas, como geometrías anidadas y atributos asociados.

Este formato es particularmente ventajoso para aplicaciones en línea y servicios web debido a su facilidad de edición y procesamiento. No obstante, puede presentar desafíos en términos de eficiencia de almacenamiento y rendimiento comparado con formatos binarios, y los archivos GeoJSON tienden a ser más grandes, lo que

puede impactar el procesamiento.

3. KML/KMZ (.kml, .kmz): KML (Keyhole Markup Language) es un formato basado en XML desarrollado para Google Earth, mientras que KMZ es su versión comprimida. KML permite la descripción de datos geoespaciales y elementos gráficos en un formato accesible para diversas plataformas de visualización geoespacial. El formato KML es compatible con Google Earth y otras herramientas de visualización, y el formato comprimido KMZ facilita la compartición de datos. Sin embargo, la complejidad del XML puede resultar en archivos de mayor tamaño y una menor eficiencia en el procesamiento y almacenamiento de grandes volúmenes de datos.
4. GML (.gml): GML (Geography Markup Language) es un estándar abierto desarrollado por el Open Geospatial Consortium (OGC) para el intercambio de datos geoespaciales. GML proporciona una gran flexibilidad y extensibilidad, permitiendo la representación de datos complejos y relaciones espaciales. Este formato es ideal para la interoperabilidad entre diferentes sistemas y plataformas debido a su estructura extensible. Sin embargo, su complejidad y el mayor tamaño de los archivos pueden resultar en un procesamiento más lento y en mayores desafíos en la creación y análisis.
5. GeoTIFF (.tif): GeoTIFF es una extensión del formato TIFF que incluye metadatos geoespaciales, como proyección y coordenadas. Este formato es ampliamente soportado en software SIG y es eficiente para almacenar grandes cantidades de datos rasterizados junto con información geográfica adicional. GeoTIFF ofrece una buena eficiencia en almacenamiento y procesamiento, aunque el tamaño relativamente grande de los archivos y la necesidad de software especializado para manejar los metadatos pueden representar limitaciones.
6. JPEG2000 (.jp2): JPEG2000 es una versión avanzada del formato JPEG que soporta tanto compresión sin pérdida como con pérdida. Este formato es conocido por su alta eficiencia de compresión y su capacidad para manejar grandes volúmenes de datos rasterizados. Aunque JPEG2000 ofrece una compresión eficiente y preserva la calidad de los datos, su menor compatibilidad en comparación con GeoTIFF y su mayor complejidad en la implementación y procesamiento son desventajas a considerar.
7. ECW (.ecw): ECW (Enhanced Compressed Wavelet) es un formato propietario diseñado para la compresión eficiente de datos rasterizados. Este formato es particularmente eficaz para almacenar y acceder a grandes imágenes rasterizadas y mosaicos de datos. La compresión avanzada de ECW proporciona un rápido acceso y procesamiento de datos comprimidos. Sin embargo, su naturaleza propietaria puede limitar su uso en software no compatible y puede requerir licencias para su implementación y distribución.
8. Network Common Data Form (NetCDF): NetCDF es un formato utilizado para el almacenamiento y manipulación de datos multidimensionales, como datos de redes y datos climatológicos. Es ideal para datos científicos y ambientales complejos debido a su soporte para datos multidimensionales y temporales. NetCDF ofrece

alta eficiencia en almacenamiento y acceso a datos, aunque su complejidad en el uso y manipulación y la necesidad de software especializado para lectura y análisis pueden ser limitaciones.

9. CityGML: CityGML es un estándar para la representación y el intercambio de modelos urbanos en 3D, utilizado para modelar edificios, infraestructura y otros elementos urbanos. Facilita la interoperabilidad y el intercambio de modelos 3D entre diferentes sistemas. CityGML proporciona un modelado detallado y semántico de entornos urbanos, pero su complejidad en la creación y gestión de modelos detallados y la necesidad de software especializado para edición y visualización pueden representar desafíos.

2.6.1. Formatos de Bases de Datos Geoespaciales

Los propios Sistemas Gestores de Bases de Datos, tienen sus formatos específicos, de los cuales destacamos:

1. WKT (Well-Known Text): WKT es un formato de texto utilizado para representar geometrías geoespaciales de manera legible y estandarizada. Este formato es ampliamente utilizado en sistemas de información geográfica y bases de datos geoespaciales debido a su simplicidad y facilidad de uso. WKT permite describir una variedad de tipos geométricos, como puntos, líneas, polígonos, multipuntos, multilíneas y multipolígonos, utilizando una sintaxis textual clara y comprensible. La principal ventaja de WKT es su legibilidad humana. Los datos geoespaciales representados en WKT son fácilmente entendibles y editables por personas sin necesidad de herramientas especializadas. Por ejemplo, la representación de un punto en WKT podría ser POINT (30 10), mientras que una línea podría representarse como LINESTRING (30 10, 10 30, 40 40). Facilita la verificación visual y la manipulación directa de las geometrías.

WKT es parte de la especificación Simple Features del Open Geospatial Consortium (OGC), al igual que Well-Known Binary (WKB), que veremos a continuación. Esta especificación asegura que los datos geoespaciales en WKT puedan ser interpretados correctamente por una amplia gama de software SIG y bases de datos geoespaciales. Esta interoperabilidad es crucial para aplicaciones que requieren el intercambio de datos espaciales entre diferentes sistemas y plataformas.

Aunque WKT es altamente legible y fácil de usar, tiene algunas desventajas en comparación con WKB. Debido a que es un formato de texto, los datos geoespaciales en WKT ocupan más espacio de almacenamiento que su equivalente binario en WKB. Además, la transmisión de datos en formato de texto puede ser más lenta y consumir más ancho de banda, especialmente cuando se manejan grandes volúmenes de datos espaciales.

En términos de eficiencia de procesamiento, WKT también puede ser menos eficiente que WKB. Las operaciones espaciales complejas pueden requerir la conversión de WKT a formatos binarios internos para su procesamiento, lo

que añade una capa adicional de computación. Sin embargo, la simplicidad y legibilidad de WKT hacen que sea una herramienta valiosa para muchas aplicaciones, especialmente aquellas que requieren la edición y revisión manual de datos geoespaciales.

2. Well-Known Binary: Well-Known Binary es un formato binario utilizado para representar geometrías geoespaciales de manera compacta. Este formato es comúnmente empleado en bases de datos geoespaciales como PostGIS, una extensión de la base de datos PostgreSQL que soporta operaciones espaciales complejas. WKB permite codificar eficientemente una variedad de tipos geométricos, incluyendo puntos, líneas y polígonos, en una estructura binaria que es más eficiente en términos de almacenamiento y procesamiento que los formatos de texto.

El uso de WKB proporciona una eficiencia significativa en el almacenamiento de datos geoespaciales. Debido a su naturaleza binaria, WKB reduce el espacio necesario para almacenar geometrías en comparación con formatos de texto como Well-Known Text. Además, la transmisión de datos en formato binario es generalmente más rápida y consume menos ancho de banda, lo cual es crucial para aplicaciones que manejan grandes volúmenes de datos espaciales.

WKB es compatible con una amplia gama de software de Sistemas de Información Geográfica y bases de datos geoespaciales, lo que facilita la interoperabilidad entre diferentes sistemas y aplicaciones. Al seguir el estándar definido por el Open Geospatial Consortium (OGC), WKB asegura que los datos geométricos puedan ser interpretados correctamente por diversos programas y plataformas, permitiendo una integración y análisis eficiente de datos espaciales.

Sin embargo, WKB tiene algunas desventajas importantes. Una de las principales es su menor legibilidad humana en comparación con formatos de texto como WKT. La representación binaria de las geometrías no es fácilmente comprensible sin el uso de software especializado. Además, la interpretación y manipulación de datos en formato WKB requieren herramientas y conocimientos técnicos específicos, lo que puede representar una barrera para algunos usuarios.

Well-Known Binary es un formato binario eficiente y ampliamente compatible para la representación de geometrías geoespaciales. Aunque ofrece ventajas significativas en términos de almacenamiento y procesamiento, su menor legibilidad humana y la necesidad de software especializado para su uso son desventajas que deben ser consideradas.

2.7. Visualización de Datos Geográficos

La visualización de datos geográficos es una parte esencial de las Tecnologías de la Información Geográfica. A través de la representación gráfica de datos espaciales en forma de mapas, gráficos y otros medios visuales, se pueden comunicar patrones, tendencias y relaciones espaciales de manera clara y comprensible. Este capítulo explora los principios, técnicas y herramientas utilizadas en la visualización de datos geográficos

y su importancia en la toma de decisiones informadas.

2.7.1. Principios de Visualización de Datos Geográficos

La visualización efectiva de datos geográficos se basa en varios principios fundamentales: **Simplicidad:** Los mapas y gráficos deben ser lo más simples y claros posible para facilitar la comprensión de la información por parte del usuario. La sobrecarga de información puede dificultar la interpretación y desviar la atención de los patrones clave.

1. **Claridad:** La información representada debe ser clara y fácil de interpretar. Los colores, símbolos y etiquetas deben ser legibles y distinguibles entre sí para evitar malentendidos y errores de interpretación (Alan M MacEachren, 2004).
2. **Proporción y Escala:** Mantener una escala apropiada en los mapas es crucial para preservar la precisión y la proporcionalidad de los elementos representados. La escala incorrecta puede llevar a interpretaciones erróneas y decisiones inexactas.
3. **Interactividad:** La capacidad de interactuar con los datos geográficos, como hacer zoom, filtrar datos y ver detalles adicionales, mejora la experiencia del usuario y facilita la exploración de la información. Las herramientas interactivas permiten a los usuarios adaptar la visualización a sus necesidades específicas.

2.7.2. Técnicas de Visualización de Datos Geográficos

La visualización de datos geográficos es una herramienta crucial en la ciencia de datos, permitiendo una comprensión profunda de los patrones espaciales y temporales en diversos campos de estudio. Desde la epidemiología hasta la planificación urbana, la capacidad de representar datos geográficos de manera efectiva es fundamental para el análisis y la toma de decisiones informadas. Incluso, la manera de representar los datos geográficos pueden determinar intereses, entre otros políticos (Monmonier, 2018). Este capítulo aborda las principales técnicas de visualización de datos geográficos, analizando sus fortalezas, limitaciones y aplicaciones en diferentes contextos científicos.

1. Representaciones Cartográficas:

Las representaciones cartográficas son herramientas fundamentales en la geografía y otras ciencias que estudian fenómenos espaciales. Se refieren a la manera en que se visualiza y comunica información geoespacial a través de diferentes tipos de mapas. Estas representaciones permiten transformar datos complejos en formatos visuales comprensibles, facilitando el análisis, la interpretación y la toma de decisiones.

- **Mapas Coropléticos:** Los mapas coropléticos son una de las técnicas más comunes para la visualización de datos geográficos. Estos mapas utilizan diferentes colores o patrones para representar valores de datos en áreas específicas, como países, estados o municipios. La principal ventaja de los

mapas coropléticos es su capacidad para mostrar claramente las variaciones espaciales de un conjunto de datos. Sin embargo, la elección de la paleta de colores y la clasificación de los datos son factores críticos para evitar distorsiones en la interpretación visual. Una mala elección puede llevar a una percepción errónea de la magnitud de las diferencias entre áreas.

- Mapas de Isolíneas: Los mapas de isolíneas, también conocidos como mapas de contornos, utilizan líneas para conectar puntos de igual valor en un espacio geográfico. Esta técnica es particularmente útil para representar variables continuas como la altitud, la temperatura o la presión atmosférica. Los mapas de isolíneas permiten una comprensión intuitiva de los gradientes espaciales y son esenciales en campos como la meteorología y la geología.
- Mapas de Puntos: Los mapas de puntos emplean símbolos, generalmente puntos, para representar la ubicación de eventos o características específicas en un área geográfica. Cada punto en el mapa indica la presencia de una característica o evento. Esta técnica es ideal para mostrar la distribución espacial de fenómenos discretos, como crímenes, casos de enfermedades o ubicaciones de infraestructuras.

2. Métodos de Visualización:

Además de las representaciones cartográficas, existen varios métodos avanzados de visualización que complementan y amplían las capacidades de los mapas tradicionales. Estos métodos permiten a los investigadores y analistas explorar y comunicar datos geoespaciales de maneras más dinámicas e interactivas.

- Mapas de Calor: Otra técnica ampliamente utilizada es la visualización mediante mapas de calor, que representan la densidad de puntos de datos utilizando una escala de colores. Los mapas de calor son particularmente efectivos para identificar concentraciones de eventos o fenómenos en un área geográfica. Según (Andrienko et al., 2010), esta técnica es invaluable en estudios de criminalidad, distribución de enfermedades y análisis de tráfico, entre otros. La capacidad de ajustar la granularidad de la visualización permite a los analistas enfocarse en áreas específicas o examinar patrones a gran escala.
- Cartografía de Flujo: La cartografía de flujo es una técnica especializada para visualizar movimientos o flujos entre diferentes ubicaciones geográficas. Esta técnica es esencial en el análisis de rutas de transporte, migraciones y comercio internacional. (Kraak, 2014) señala que la representación de flujos puede variar desde simples líneas que conectan puntos hasta complejas animaciones que muestran cambios a lo largo del tiempo. Esta variabilidad en la representación permite una comprensión más intuitiva de las dinámicas espaciales y temporales, facilitando la identificación de patrones de movimiento y cambios en la intensidad de los flujos.
- Modelos Tridimensionales (3D): Con el avance de las tecnologías de visualiza-

ción, los modelos tridimensionales han ganado popularidad. Estos modelos proporcionan una perspectiva más detallada y realista del terreno, lo que es particularmente útil en estudios geológicos, planificación urbana y análisis ambiental. (Wood et al., 2011) argumentan que la integración de datos de elevación con otras variables geográficas en modelos 3D permite una mejor comprensión de las relaciones espaciales y la identificación de patrones que no serían visibles en representaciones bidimensionales. Además, los modelos 3D pueden ser combinados con datos temporales para visualizar cambios en el paisaje a lo largo del tiempo.

- **Visualización Interactiva:** La visualización interactiva ha revolucionado la forma en que se exploran y presentan los datos geográficos. Utilizando Sistemas de Información Geográfica y plataformas web, los usuarios pueden interactuar con los datos, filtrarlos y personalizar la visualización según sus necesidades específicas. (Longley et al., 2015) destacan que herramientas como ArcGIS, QGIS y Google Earth y sobre todo los nuevos visores web, que han democratizado el acceso a la visualización de datos geográficos, permitiendo a usuarios de diferentes disciplinas y niveles de experiencia explorar y analizar datos espaciales de manera efectiva. La interactividad mejora la accesibilidad y la comprensión de los datos, facilitando la toma de decisiones informadas.

2.7.3. Librerías para Desarrollo de Aplicaciones

A continuación exploraremos las principales librerías especializadas en la visualización de datos geoespaciales, destacando sus capacidades para transformar datos complejos en representaciones visuales claras y útiles para el análisis geográfico

- **Matplotlib:** Librería de trazado en 2D en Python, ampliamente utilizada para la visualización básica de datos geoespaciales. Es versátil y permite crear gráficos y mapas sencillos.
- **Basemap:** Extensión de Matplotlib que facilita la creación de mapas en 2D y la superposición de datos sobre proyecciones cartográficas. Aunque ya está en desuso y se recomienda usar Cartopy, sigue siendo útil para proyectos legados.
- **Cartopy:** Basada en Matplotlib, ofrece una interfaz para la creación de mapas geoespaciales y la manipulación de datos geográficos. Es ideal para la visualización de datos en proyecciones cartográficas y análisis espacial.
- **Folium:** Librería interactiva basada en Leaflet.js para la visualización de mapas en aplicaciones web. Soporta la integración de datos GeoJSON y TopoJSON, permitiendo la creación de mapas interactivos con facilidad.
- **Geopandas:** Extensión de Pandas que simplifica la manipulación y visualización de datos geoespaciales en Python. Facilita el análisis espacial y la integración con otras librerías de visualización.
- **Plotly:** Proporciona visualizaciones interactivas y soporte para mapas choropleth

y de calor. Ideal para explorar datos geospaciales dinámicamente y crear gráficos interactivos.

- Leaflet: Librería de JavaScript para crear mapas interactivos en aplicaciones web. Puede integrarse con Python mediante Folium y es ampliamente utilizada por su simplicidad y eficacia en la creación de mapas interactivos.
- OpenLayers: Otra librería de JavaScript para mapas interactivos en aplicaciones web, con soporte avanzado para formatos de datos geospaciales y proyecciones cartográficas. Permite una amplia gama de personalizaciones y funcionalidades avanzadas.

En el ámbito del desarrollo de aplicaciones geospaciales, las librerías 3D juegan un papel crucial al permitir la visualización inmersiva y detallada de datos geográficos. A continuación, se presentan tres herramientas clave que permiten la creación de mapas y gráficos tridimensionales en distintos entornos.

- CesiumJS: Librería JavaScript para crear aplicaciones de mapas 3D en el navegador web. Permite la visualización de datos geospaciales en entornos tridimensionales, ofreciendo una experiencia inmersiva y detallada.
- Three.js: Biblioteca JavaScript para la creación de gráficos y visualizaciones en 3D en el navegador. Puede ser utilizada para proyectos que requieren representaciones tridimensionales de datos geospaciales, proporcionando un control avanzado sobre la visualización.
- Glob3 Mobile: Plataforma diseñada para la visualización y análisis de datos geospaciales en dispositivos multiplataforma. Se enfoca en la representación tridimensional de información geográfica, permitiendo la visualización de terrenos, edificaciones y otros elementos en 3D. Facilita una experiencia interactiva y fluida para explorar datos geográficos desde dispositivos móviles.

2.8. Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE)

Las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE) son sistemas diseñados para facilitar el acceso, intercambio y uso de datos geospaciales entre diferentes usuarios y aplicaciones. La importancia de las IDEs radica en su capacidad para integrar datos geográficos de diversas fuentes, estandarizar su formato y asegurar su disponibilidad a través de plataformas interoperables. Este apartado explorará los conceptos fundamentales de las IDE, sus componentes, beneficios, desafíos y aplicaciones prácticas, así como su evolución en el contexto de las tecnologías modernas (Mansourian et al., 2006).

2.8.1. Definición y Concepto de IDE

Las IDEs se definen como marcos tecnológicos, organizativos y legales que facilitan el acceso, intercambio y uso de datos geospaciales. De acuerdo con (Shi et al., 2011), una IDE es la tecnología, las políticas, los estándares y los recursos humanos necesarios para adquirir, procesar, almacenar, distribuir y mejorar el uso de los datos geospaciales.

Estos sistemas son esenciales para la integración y armonización de datos espaciales provenientes de múltiples fuentes, permitiendo una gestión eficiente y coherente de la información geoespacial.

2.8.2. Componentes de una IDE

Una IDE típicamente consta de varios componentes clave:

1. **Datos Espaciales:** Incluyen datos geográficos de diversas fuentes, como imágenes satelitales, datos topográficos, censos y datos de sensores. Estos datos son fundamentales para cualquier análisis espacial y deben ser precisos, actualizados y accesibles.
2. **Metadatos:** Información que describe los datos espaciales, incluyendo su origen, formato, calidad y condiciones de uso. Los metadatos facilitan la búsqueda, evaluación y uso de los datos, garantizando que los usuarios puedan entender y confiar en la información que están utilizando.
3. **Normas y Estándares:** Conjunto de reglas y protocolos que aseguran la interoperabilidad y consistencia de los datos espaciales. Ejemplos incluyen los estándares del Open Geospatial Consortium (OGC) y la ISO. Estos estándares permiten que los datos de diferentes fuentes y formatos se integren de manera efectiva.
4. **Redes y Servicios:** Infraestructura tecnológica que permite el acceso y la distribución de datos geoespaciales, incluyendo servidores, redes y servicios web. Los servicios web como los servicios de mapas o *Web Map Service* (WMS) y los servicios de datos o *Web Feature Service* (WFS) son cruciales para la accesibilidad y el intercambio de datos.
5. **Políticas y Marcos Legales:** Normativas y políticas que regulan el acceso, uso y distribución de los datos geoespaciales. Estas políticas aseguran que los datos se utilicen de manera ética y legal, protegiendo la privacidad y los derechos de propiedad intelectual.
6. **Usuarios y Aplicaciones:** Diversos grupos de usuarios, desde administraciones públicas y empresas hasta investigadores y el público en general, que utilizan los datos para diferentes aplicaciones. La capacidad de los usuarios para acceder y utilizar los datos de manera efectiva es crucial para el éxito de una IDE.

En la Figura 2.12 puede verse los componentes de las IDE, mientras en la Figura 2.13 podemos ver un mapa que toma de fuente datos provenientes de una IDE, concretamente el servicio WMS que ofrece Grafcan para las ortofotografías de Canarias.

2.8.3. Evolución Histórica de las IDEs

La evolución de las IDEs ha estado impulsada por la creciente necesidad de compartir y reutilizar datos geoespaciales. A continuación se destacan algunos hitos importantes en su desarrollo:

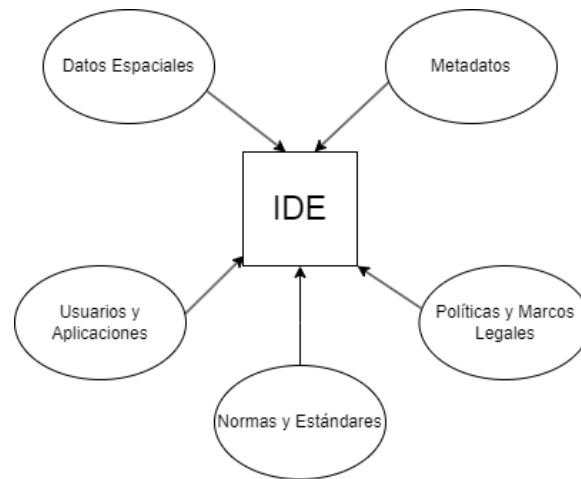


Figura 2.12: Componentes principales de una IDE

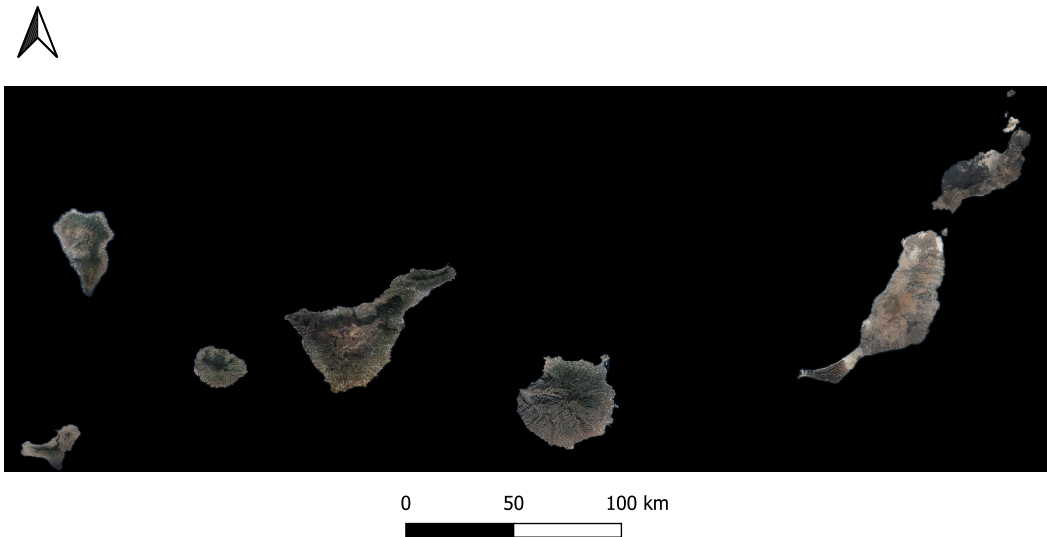


Figura 2.13: Mapa que toma como fuente de información una servicio WMS de una IDE. Elaboración propia

1. Década de 1980: Inicios de la estandarización y la creación de redes para compartir datos geoespaciales. Los esfuerzos iniciales se centraron en la creación de estándares básicos y en la formación de redes de colaboración.
2. Década de 1990: Con el desarrollo de Internet, se establecieron las primeras IDEs nacionales y regionales. Esta etapa marcó el comienzo de la integración más amplia de datos a través de plataformas en línea y el desarrollo de las primeras versiones de sistemas de información geográfica accesibles a través de la web.
3. 2000s: La creación y expansión de IDEs a nivel internacional. La Directiva (Infrastructure for Spatial Information in the European Community) (*Inspire*, 2024) de la Unión Europea, adoptada en 2007, es un ejemplo prominente de una iniciativa a gran escala para desarrollar una IDE integrada a nivel europeo. Esta etapa también vio el aumento de las IDEs en países en desarrollo y la adopción de tecnologías emergentes.

2.8.4. Ejemplos de Grandes Proyectos Gubernamentales de IDE

A continuación enumeramos algunos de los proyectos gubernamentales de IDE más importantes.

1. NSDI (Estados Unidos): La National Spatial Data Infrastructure (NSDI) es una de las IDEs más desarrolladas y ha establecido un modelo para otras iniciativas. La NSDI incluye una amplia gama de datos geoespaciales accesibles a través del portal Geospatial One-Stop. La colaboración entre agencias gubernamentales, organizaciones privadas y académicas ha sido clave para su éxito. El NSDI promueve la interoperabilidad y el acceso a datos mediante estándares y servicios web, facilitando el uso de datos en aplicaciones federales, estatales y locales.
2. INSPIRE (Europa): La Directiva INSPIRE busca crear una infraestructura armonizada de datos espaciales a nivel europeo. Ha desarrollado estándares y directrices para garantizar la interoperabilidad de los datos geoespaciales entre los estados miembros. La implementación de citep ha enfrentado desafíos relacionados con la diversidad de sistemas y datos en diferentes países, pero ha promovido la cooperación y el desarrollo de una infraestructura integrada a nivel continental.
3. INDE (Brasil): La Infraestructura Nacional de Datos Espaciales (INDE) proporciona un marco para la integración y acceso a datos geoespaciales en Brasil. INDE ha mejorado significativamente la disponibilidad de datos geográficos en el país, apoyando la toma de decisiones en planificación y gestión. Sin embargo, enfrenta desafíos en términos de financiamiento y actualización de datos, lo que limita su capacidad para ofrecer datos siempre precisos y actuales.

2.8.5. Beneficios y desafíos de las IDE

Las IDEs han demostrado numerosos beneficios, incluyendo: Mejora en la Toma de Decisiones: La disponibilidad de datos geoespaciales precisos y actualizados facilita la toma de decisiones informadas en áreas como la planificación urbana, la gestión de recursos naturales y la respuesta a desastres. La integración de datos de múltiples fuentes permite un análisis más completo y preciso.

1. Eficiencia Operacional: La integración y el acceso centralizado a los datos reducen la duplicación de esfuerzos y mejoran la eficiencia en la gestión de información. Los usuarios pueden evitar la recolección redundante de datos y utilizar información ya disponible.
2. Transparencia y Accesibilidad: Las IDEs promueven la transparencia y la accesibilidad de los datos geoespaciales, facilitando su uso por parte de diferentes actores y el público en general. La disponibilidad de datos abiertos mejora la confianza pública y fomenta la participación ciudadana.
3. Colaboración y Cooperación: Fomentan la colaboración entre distintas entidades, promoviendo un enfoque integrado y holístico en la gestión de información espacial. La cooperación entre agencias gubernamentales, organizaciones no

gubernamentales y el sector privado fortalece la capacidad para abordar desafíos complejos.

A pesar de sus beneficios, la implementación de las IDEs también enfrenta varios desafíos:

1. **Interoperabilidad** La diversidad de formatos y estándares de datos entre diferentes organismos puede dificultar la integración y el uso eficiente de los datos. La falta de estándares comunes y la variabilidad en la calidad de los datos pueden crear barreras para la interoperabilidad.
2. **Financiamiento y Recursos:** La creación y mantenimiento de una IDE requiere inversión continua en tecnología, formación y recursos humanos. Los costos asociados con el desarrollo y la operación de una IDE pueden ser significativos, y el financiamiento adecuado es crucial para su sostenibilidad.
3. **Actualización y Mantenimiento de Datos:** Asegurar que los datos sean precisos y estén actualizados es un desafío constante. La obsolescencia de los datos puede afectar la calidad de la toma de decisiones y la utilidad general de la IDE.
4. **Adopción y Uso** La resistencia al cambio y la falta de capacitación pueden limitar la adopción y uso efectivo de las IDEs por parte de los usuarios. La formación adecuada y el apoyo continuo son necesarios para asegurar que los usuarios puedan aprovechar al máximo las capacidades de la IDE.

DESAFÍOS Y PROYECCIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

La gestión de datos en los Sistemas de Información Geográfica enfrenta varios desafíos complejos y multifacéticos. A medida que las tecnologías avanzan y la cantidad de datos geoespaciales disponibles aumenta, la gestión efectiva de estos datos se vuelve crucial para maximizar el potencial de los SIG en diversas aplicaciones. A continuación, se detallan algunos de los desafíos más significativos, respaldados por referencias académicas y prácticas del campo.

1. **Volumen y Variedad de Datos:** Los SIG manejan enormes volúmenes de datos provenientes de diversas fuentes, como satélites, sensores, GPS, drones y datos de campo (Longley et al., 2017). Esta variedad de datos puede ser estructurada, semi-estructurada o no estructurada, lo que plantea desafíos en términos de almacenamiento, procesamiento y análisis (Michael F Goodchild et al., 2012a). La capacidad de integrar y manejar datos de diferentes formatos y resoluciones es crucial para obtener una visión holística del entorno geoespacial (Heipke, 2010).
 - **Almacenamiento y Gestión de Datos:** El manejo de grandes volúmenes de datos requiere soluciones de almacenamiento robustas que puedan manejar la expansión continua de datos. La escalabilidad de las infraestructuras de almacenamiento es vital para asegurar que los SIG puedan gestionar el crecimiento de datos sin comprometer el rendimiento (Jensen, 2009).
 - **Integración de Datos Diversos:** Integrar datos provenientes de diferentes fuentes y formatos requiere técnicas avanzadas de fusión de datos y herramientas que puedan procesar información variada para proporcionar una representación coherente y útil.
2. **Calidad de los Datos:** La calidad de los datos es un desafío constante en los SIG. Los datos geoespaciales pueden contener errores, inexactitudes e inconsistencias debido a varias razones, como la precisión de los dispositivos de captura, la temporalidad de los datos y la calidad del procesamiento inicial (Faiz et al., 1996). Asegurar la precisión, coherencia y actualidad de los datos es esencial para realizar análisis fiables y tomar decisiones informadas.

- Errores de Captura y Medición: Las imprecisiones en la captura de datos pueden originarse por limitaciones de los dispositivos de medición o condiciones ambientales. Es fundamental implementar procesos de validación y corrección de datos para minimizar estos errores (Unwin, 1995).
 - Mantenimiento de la Actualidad de los Datos: La actualización continua de los datos es esencial para mantener su relevancia. Los datos desactualizados pueden conducir a decisiones incorrectas y análisis poco fiables.
3. Interoperabilidad y Estandarización: Los datos geoespaciales suelen proceder de múltiples fuentes y sistemas que pueden utilizar diferentes formatos y estándares. La interoperabilidad entre estos sistemas es fundamental para permitir el intercambio y la integración de datos. Sin embargo, la falta de estándares comunes y la incompatibilidad entre sistemas pueden dificultar la integración y el uso eficiente de los datos (OGC, 2024).
- Estandarización de Formatos de Datos: La implementación de estándares comunes y protocolos de intercambio, como los propuestos por el Open Geospatial Consortium (OGC), es crucial para mejorar la interoperabilidad y facilitar la integración de datos (OGC, 2024).
 - Desafíos en la Interoperabilidad: La diversidad en los formatos de datos y las especificaciones técnicas puede complicar la interoperabilidad, requiriendo herramientas y métodos que puedan convertir y armonizar los datos entre sistemas.
4. Seguridad y Privacidad: La seguridad y la privacidad de los datos geoespaciales son preocupaciones críticas, especialmente cuando se manejan datos sensibles o confidenciales. La protección contra el acceso no autorizado, la manipulación de datos y las brechas de seguridad es vital para mantener la integridad y la confianza en los sistemas SIG. Además, la privacidad de los datos individuales, como la información de ubicación de personas, debe ser gestionada cuidadosamente para cumplir con las normativas y proteger los derechos de los individuos (Greene, 2000).
- Protección de Datos Sensibles: Es necesario implementar medidas de seguridad avanzadas para proteger los datos contra accesos no autorizados y vulnerabilidades de seguridad. Esto incluye el uso de cifrado y sistemas de autenticación.
 - Cumplimiento Normativo: La gestión de la privacidad de los datos debe cumplir con regulaciones y leyes de protección de datos, como el GDPR en Europa, para asegurar la protección de la información personal (GDPR, 2024).
5. Almacenamiento y Escalabilidad: El almacenamiento de grandes volúmenes de datos geoespaciales requiere infraestructuras robustas y escalables. A medida que la cantidad de datos aumenta, la necesidad de soluciones de almacenamiento

eficientes y escalables se vuelve más apremiante. Las tecnologías de almacenamiento en la nube ofrecen soluciones flexibles, pero también presentan desafíos en términos de gestión de costos y rendimiento (Zyl, 2014).

- Infraestructuras de Almacenamiento Escalables: Las soluciones de almacenamiento deben ser capaces de escalar de manera eficiente para manejar el crecimiento de datos. Las arquitecturas basadas en la nube proporcionan flexibilidad, pero es esencial gestionar los costos y el rendimiento de manera efectiva (Iglewicz et al., 2021).
 - Optimización del Rendimiento de Almacenamiento: La gestión eficiente del rendimiento de almacenamiento es crucial para garantizar el acceso rápido y fiable a grandes conjuntos de datos.
6. Procesamiento y Análisis de Datos: El procesamiento y análisis de grandes conjuntos de datos geoespaciales requieren capacidades computacionales significativas. Los algoritmos de análisis espacial y las técnicas de geoprocésamiento pueden ser intensivos en recursos, lo que plantea desafíos en términos de tiempo de procesamiento y eficiencia. La implementación de técnicas de big data y aprendizaje automático puede ayudar a superar algunos de estos desafíos, pero también requiere habilidades especializadas y recursos computacionales avanzados (Seethapathy et al., 2018).
- Recursos Computacionales Intensivos: La capacidad de procesamiento debe ser suficiente para manejar grandes volúmenes de datos y ejecutar algoritmos complejos de análisis espacial.
 - Integración de Big Data y Aprendizaje Automático: La adopción de técnicas avanzadas como el aprendizaje automático puede mejorar la eficiencia del análisis, pero requiere un conocimiento especializado y acceso a recursos computacionales avanzados.
7. Actualización y Mantenimiento de Datos: La actualización continua y el mantenimiento de los datos geoespaciales son esenciales para asegurar que la información sea relevante y precisa. Sin embargo, mantener los datos actualizados puede ser un desafío, especialmente cuando se trata de datos dinámicos que cambian rápidamente, como la información de tráfico o los datos meteorológicos (Jiang et al., 2021). Los sistemas y procesos para la captura y actualización de datos deben ser eficientes y fiables para mantener la calidad de los datos.
- Procesos de Actualización Eficientes: Establecer procesos eficientes para la actualización de datos es crucial para mantener la precisión y relevancia de la información geoespacial.
 - Manejo de Datos Dinámicos: Los datos que cambian rápidamente, como los de tráfico o meteorológicos, requieren métodos específicos para asegurar su actualización oportuna y precisa.

8. **Visualización de Datos:** La visualización efectiva de datos geoespaciales es fundamental para interpretar y comunicar la información. Sin embargo, la visualización de grandes conjuntos de datos con múltiples capas de información puede ser compleja. Las herramientas y técnicas de visualización deben ser capaces de manejar esta complejidad y presentar la información de manera clara y comprensible para diferentes audiencias.
 - **Herramientas de Visualización Avanzadas:** Se necesitan herramientas y técnicas que puedan gestionar y representar grandes volúmenes de datos de manera efectiva, asegurando que la información sea accesible y comprensible.
 - **Diseño de Visualizaciones Efectivas:** El diseño de visualizaciones debe considerar la claridad y la utilidad de la información para diferentes tipos de usuarios y propósitos.

9. **Capacitación y Competencia del Personal:** La gestión efectiva de los datos en los SIG requiere personal capacitado y competente en diversas disciplinas, incluyendo la geografía, la informática, la estadística y el análisis de datos (Batty, 2012). La formación continua y el desarrollo profesional son esenciales para asegurar que el personal esté al día con las últimas tecnologías y métodos de gestión de datos geoespaciales.
 - **Desarrollo Profesional Continuo:** La capacitación continua y el desarrollo profesional son esenciales para mantener a los profesionales actualizados con las últimas herramientas, tecnologías y métodos de gestión de datos.
 - **Multidisciplinariedad:** El personal debe tener una combinación de habilidades en geografía, informática y análisis de datos para gestionar eficazmente los sistemas SIG.

3.1. Aplicaciones de las Tecnologías de la Información Geográfica

Las Tecnologías de la Información Geográfica han transformado significativamente la forma en que se gestionan y analizan los datos espaciales en diversos sectores. Estas tecnologías se utilizan para abordar problemas específicos y optimizar la toma de decisiones en una amplia gama de aplicaciones temáticas. En esta sección, se exploran las aplicaciones de las TIG para diferentes verticales, incluyendo gestión ambiental, agricultura de precisión, seguridad pública, gestión de recursos naturales, transporte y logística, planificación urbana y telecomunicaciones.

1. Seguridad Pública y Gestión de Emergencias: Las TIG son cruciales para la seguridad pública y la gestión de emergencias, ofreciendo herramientas avanzadas para la coordinación y respuesta a situaciones críticas. Durante eventos de emergencia como desastres naturales, las TIG permiten una visualización en tiempo real de la situación, facilitando la coordinación de equipos de rescate y la distribución de recursos. La integración de datos espaciales mejora la capacidad para responder rápidamente a emergencias, planificar evacuaciones y gestionar recursos de manera eficiente (Gunes et al., 2000). La protección de infraestructuras críticas también se beneficia de las TIG, ya que estas tecnologías permiten la monitorización y gestión de redes de servicios esenciales como electricidad, agua y transporte. La identificación de vulnerabilidades y la planificación de mantenimientos preventivos son posibles gracias al análisis espacial de datos relacionados con las infraestructuras críticas. La Figura 3.1 muestra un ejemplo de un cuadro de mando para analizar actos delictivos en la ciudad de Chicago.

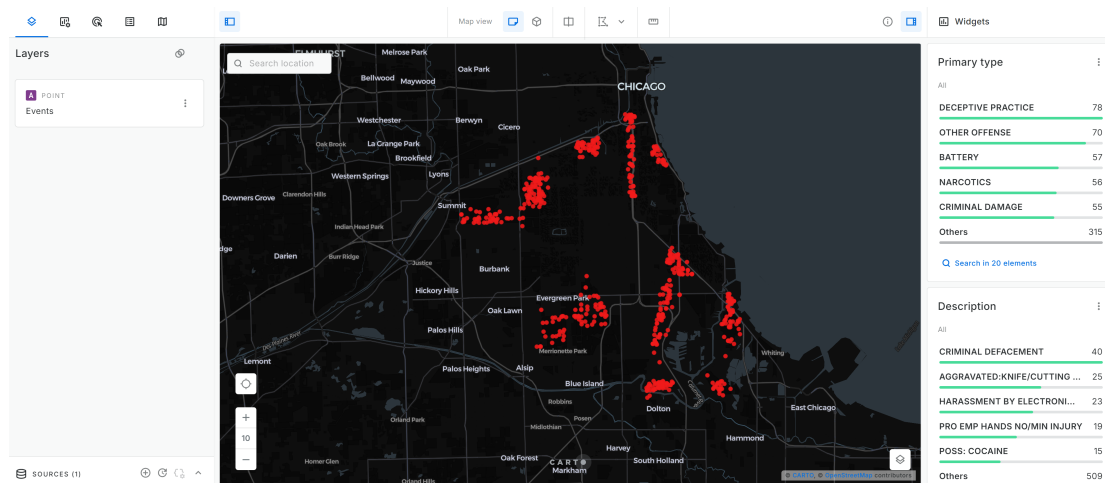


Figura 3.1: Cuadro de mando para análisis de la criminalidad den Chicago. Elaboración propia

2. Gestión del Medio Ambiente y Cambio Climático: Las TIG han revolucionado el monitoreo y la gestión ambiental al permitir la observación y análisis detallado de fenómenos ecológicos. La teledetección, por ejemplo, ofrece una visión amplia y

continua de la cobertura terrestre, facilitando la detección de cambios como la deforestación y la urbanización. Estas herramientas son esenciales para la planificación y gestión ambiental, ayudando a identificar áreas críticas que requieren protección o restauración. Las tecnologías de teledetección proporcionan datos esenciales para el monitoreo de la biodiversidad y la salud de los ecosistemas (Chuvienco Salinero et al., 2008), (Pettorelli et al., 2014). Además, en la conservación de ecosistemas, las TIG permiten gestionar áreas protegidas de manera más eficiente al integrar datos sobre biodiversidad y uso del suelo. El modelado de hábitats utilizando TIG facilita la identificación y protección de hábitats críticos y la planificación de corredores ecológicos, lo cual es fundamental para la conservación de especies y el mantenimiento de la biodiversidad. En la Figura 3.2 se muestra un caso de visualización de rutas de ballenas azules en el Océano Pacífico.

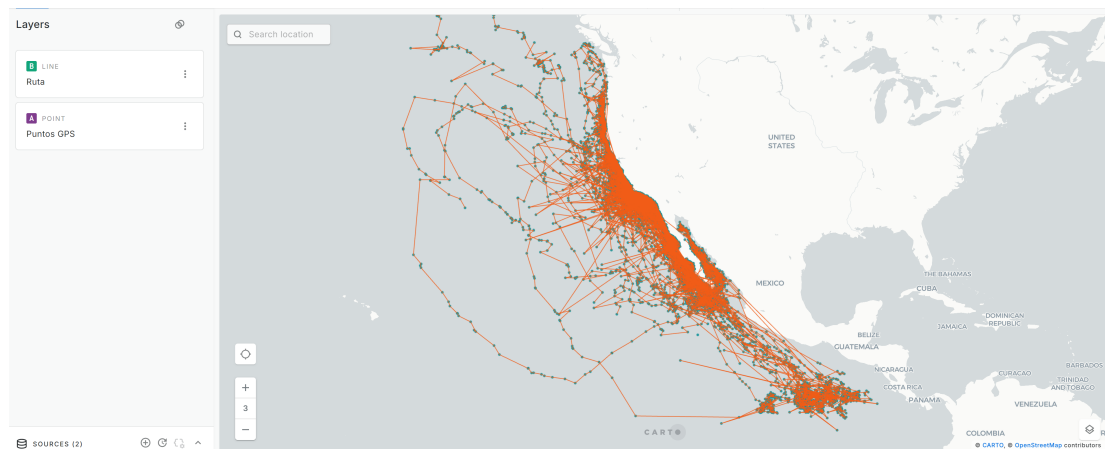


Figura 3.2: Mapa que muestra rutas de ballenas azules en el Pacífico. Elaboración propia

3. Agricultura de Precisión: La agricultura de precisión se beneficia enormemente de las TIG, que permiten una gestión más detallada y eficaz de los recursos agrícolas. Mediante el monitoreo en tiempo real de las condiciones de los cultivos y la calidad del suelo, los agricultores pueden tomar decisiones informadas sobre riego, fertilización y control de plagas. Esta capacidad de análisis espacial ayuda a mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de las prácticas agrícolas, maximizando el rendimiento de los cultivos y minimizando el impacto ambiental (Pradipta et al., 2022). En términos de logística agrícola, las TIG optimizan las rutas de cosecha y la gestión de recursos hídricos. La planificación de rutas de cosecha utilizando datos espaciales permite una recolección más eficiente y reduce los costos operativos. La gestión del riego, apoyada por datos geoespaciales, asegura una distribución más precisa del agua, optimizando el uso de este recurso vital (Mulla, 2013).
4. Gestión de Recursos Naturales: En el ámbito de la gestión de recursos naturales, las TIG juegan un papel clave en la explotación y conservación de estos recursos. En el manejo forestal, las TIG permiten el monitoreo de la salud de los bosques, la detección de plagas y enfermedades, y la planificación de actividades de manejo sostenible. Este enfoque contribuye a una gestión más eficiente y respetuosa con el

medio ambiente (Varma et al., 2000). En la minería, las TIG facilitan la exploración y evaluación de depósitos minerales, así como la planificación de operaciones mineras. La integración de datos espaciales permite una evaluación precisa de los recursos y la implementación de prácticas de gestión ambiental sostenible durante y después de las actividades mineras.

5. Transporte y Logística: Las TIG son fundamentales en la planificación y gestión del transporte y la logística, optimizando las rutas y mejorando la eficiencia operativa. La optimización de rutas de transporte se realiza mediante el análisis espacial de redes de transporte, lo que reduce costos y mejora la distribución de bienes y servicios. La monitorización del tráfico en tiempo real facilita la gestión de flujos de tráfico y la reducción de congestiones, contribuyendo a una gestión más eficiente del transporte (Ducruet et al., 2019). La gestión de flotas y recursos hídricos en el contexto del transporte también se beneficia de las TIG, permitiendo un seguimiento detallado de vehículos y una planificación más eficaz.
6. Planificación Urbana: La planificación urbana moderna se ha transformado significativamente con el uso de TIG, que permiten una gestión más eficaz del crecimiento y desarrollo de las ciudades. Las TIG facilitan la creación de modelos en 3D de entornos urbanos, permitiendo una visualización detallada de proyectos de desarrollo y su impacto en el paisaje urbano. Esto incluye la planificación de infraestructuras, la gestión de recursos urbanos y la evaluación de la capacidad de carga de las áreas urbanas. El análisis espacial de datos permite a los planificadores urbanos evaluar el impacto de nuevas construcciones en el tráfico, el uso del suelo y los servicios públicos. Las TIG también ayudan en la gestión de problemas urbanos como la congestión del tráfico y la planificación de redes de transporte (Yeh, 1999).
7. Telecomunicaciones: En el sector de las telecomunicaciones, las TIG juegan un papel esencial en la planificación y gestión de redes de comunicación. La planificación de redes de telecomunicaciones se basa en datos espaciales para optimizar la ubicación de torres de telecomunicaciones, estaciones base y otros componentes de infraestructura. El análisis espacial ayuda a garantizar una cobertura efectiva y a identificar áreas con necesidades de mejora en la cobertura (Fry, 1999). La gestión de redes de telecomunicaciones también se beneficia de las TIG al permitir el monitoreo de la infraestructura existente y la planificación de expansiones. Los datos geoespaciales son utilizados para realizar análisis de capacidad y demanda, facilitando una gestión más eficiente y la implementación de nuevas tecnologías. En la Figura 3.3 se muestra un mapa de calor de las antenas de telefonía móvil a nivel mundial.



Figura 3.3: Mapa de calor que muestra las antenas de telefonía móvil en el planeta. Elaboración propia

3.2. Cifras de Negocio de las TIG

Las previsiones para el sector de las Tecnologías de Información Geográfica son muy positivas, impulsadas por diversos factores como el crecimiento continuo de la demanda, el desarrollo de la Internet de las Cosas, la Inteligencia Artificial, la expansión de aplicaciones en diferentes sectores, las innovaciones tecnológicas y la adopción de modelos basados en la nube. A continuación se presenta un análisis detallado del estado actual y las proyecciones del mercado, respaldado por estudios recientes.

3.2.1. Principales Causas de Previsión de Crecimiento

La demanda de tecnologías SIG está en aumento debido a la urbanización acelerada y la necesidad de gestionar eficientemente recursos e infraestructuras. Las SIG proporcionan herramientas esenciales para la planificación urbana, la gestión de recursos naturales y el seguimiento de infraestructuras. Este crecimiento se refleja en las proyecciones del mercado, que muestran una expansión constante en este sector ([MarketsandMarkets, 2023](#)). Las principales causas detectadas se citan a continuación

1. **Urbanización y Gestión de Recursos:** La urbanización acelerada y la optimización de la gestión de recursos están impulsando la adopción de SIG en la planificación urbana y el manejo de infraestructuras ([Michael F Goodchild et al., 2012b](#)).
2. **Desarrollo de la Internet de las Cosas:** La integración de SIG con dispositivos IoT está creando nuevas oportunidades. Las SIG facilitan el análisis y la visualización de datos de sensores distribuidos geográficamente, fundamentales para aplicaciones como la gestión inteligente de ciudades y la agricultura de precisión. Esta integración es clave para mejorar la eficiencia en áreas como la logística y el seguimiento de activos. La combinación de SIG con IoT está revolucionando la gestión de datos en tiempo real, mejorando la toma de decisiones y la eficiencia operativa.
3. **Expansión de Aplicaciones en Diversos Sectores:** Las tecnologías SIG están siendo adoptadas en una amplia gama de industrias, incluyendo agricultura, energía, transporte, salud, turismo y gestión de emergencias. Esta diversificación de aplicaciones amplía el mercado potencial para las empresas de SIG.
4. **Diversificación del Mercado:** La adopción en sectores diversos está impulsando el crecimiento del mercado al ofrecer soluciones especializadas para diferentes necesidades.
5. **Innovaciones Tecnológicas:** Los avances en áreas como el aprendizaje automático, la inteligencia artificial y la realidad aumentada están transformando las capacidades de las SIG. Estas tecnologías permiten soluciones más sofisticadas y personalizadas, aumentando su valor en el mercado. La integración de nuevas tecnologías está ampliando las capacidades de SIG, ofreciendo soluciones avanzadas para el análisis y visualización de datos.

6. Adopción de Modelos de Negocio Basados en la Nube: La migración hacia soluciones basadas en la nube está facilitando el acceso a tecnologías SIG sin la necesidad de grandes inversiones en infraestructura. Este modelo está democratizando el acceso y expandiendo la base de clientes potenciales.

La adopción de modelos basados en la nube está creando nuevas oportunidades de mercado y permitiendo a empresas de todos los tamaños beneficiarse de las tecnologías SIG.

3.2.2. Proyecciones de Mercado por Sector

A continuación, en la Tabla 3.1 se presentan las estimaciones actuales y las proyecciones de crecimiento para diferentes sectores dentro del mercado de SIG, expresadas a través de la Tasa de Crecimiento Anual Compuesto, o *Compound Annual Growth Rate* (CAGR):

Sector	Valor (2023)	Proyección (2028)	CAGR
Agricultura	11.2	29.8	21.14 %
Ciudades Inteligentes	49.3	99.2	14.87 %
Infraestructura y Planificación Urbana	2.2	4.4	12.10 %
Transporte y Logística	1.4	2.5	12.10 %
Energía y Recursos Naturales	1.8	3.2	11.34 %
Salud y Servicios Públicos	1.0	1.7	11.25 %
Gobierno y Defensa	3.8	6.4	10.20 %
Telecomunicaciones	70.0	75.0	1.41 %

Tabla 3.1: Proyecciones y crecimiento de diferentes sectores dentro de las TIG ordenadas de mayor a menor CAGR Compound Annual Growth Rate. Cifras en miles de millones de dólares. (Statista, 2023; MarketsandMarkets, 2023; Grand View Research, 2023; The Insight Partners, 2023; Mordor Intelligence, 2023)

Mientras en la Figura 3.4 destacamos la comparativa del CAGR por sector.

Llama la atención el sector líder en las cifras de negocio: las Telecomunicaciones, que juegan un papel fundamental en la economía digital global, con un volumen de negocio estimado en 70 mil millones de dólares en 2023 dentro del contexto de las TIG, proyectándose un aumento a 75 mil millones de dólares en 2028, lo que representa un CAGR del 1.41 %. Aunque el crecimiento porcentual es menor que el de otros sectores, el volumen absoluto que maneja el sector de telecomunicaciones es considerablemente mayor. Esto destaca la importancia crítica de las telecomunicaciones como columna vertebral de las infraestructuras digitales y su papel central en la conectividad global, especialmente en un mundo cada vez más interconectado y dependiente de la tecnología digital.

Las innovaciones tecnológicas, como los sensores, drones, imágenes satelitales, y el análisis de datos en tiempo real, están revolucionando tanto la agricultura con un CAGR del 21.14 % como el desarrollo de las ciudades inteligentes con un CAGR del 14.87 %.

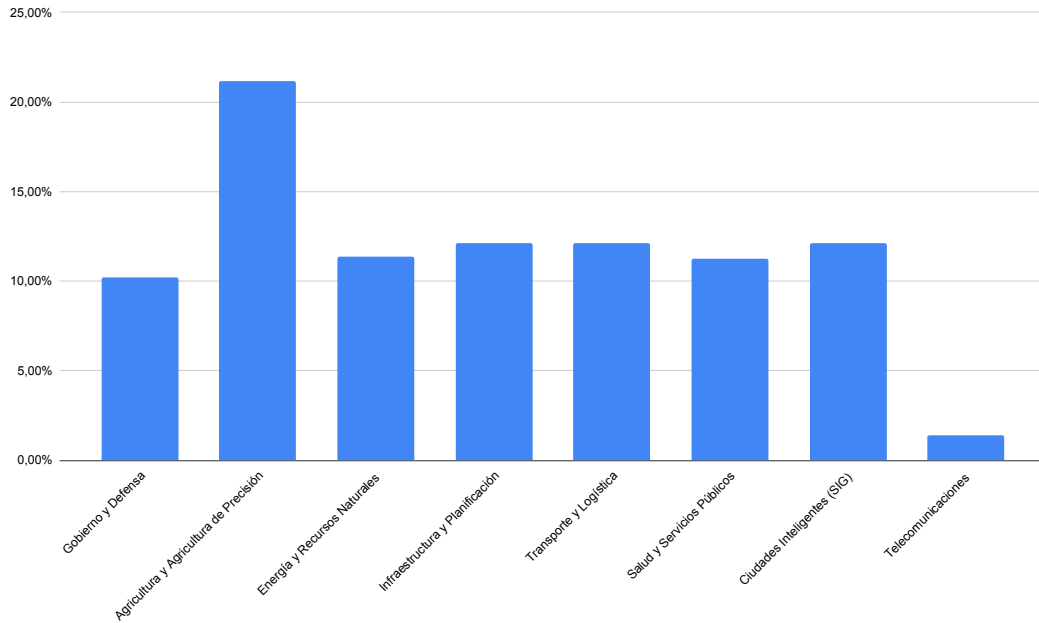


Figura 3.4: CAGR previsto por sector. (Statista, 2023; MarketsandMarkets, 2023; Grand View Research, 2023; The Insight Partners, 2023; Mordor Intelligence, 2023)

En el ámbito agrícola, estas herramientas permiten una gestión más precisa de los cultivos, lo que mejora tanto el rendimiento como la eficiencia operativa. La automatización y la robótica también juegan un papel crucial al optimizar tareas como la siembra, el riego y la cosecha, reduciendo la necesidad de mano de obra manual y aumentando la productividad general. Además, el aumento de la demanda global de alimentos está impulsando la necesidad de métodos agrícolas más eficientes. La agricultura de precisión ofrece soluciones para satisfacer esta demanda al mejorar la producción y optimizar el uso de recursos naturales, como el agua y los fertilizantes. La adopción de prácticas sostenibles también está ganando terreno, ya que estas no solo mejoran la eficiencia en el uso de recursos, sino que también minimizan el impacto ambiental de la agricultura.

Las inversiones de capital desempeñan un papel clave en este crecimiento. Los inversores están prestando cada vez más atención a *start-ups* y empresas tecnológicas que desarrollan soluciones innovadoras para la agricultura de precisión, lo que está impulsando aún más el crecimiento del mercado. Los gobiernos también están ofreciendo subvenciones y apoyo financiero a los agricultores que implementan estas tecnologías, acelerando la adopción de prácticas avanzadas. En los países en desarrollo, la adopción rápida de tecnologías de agricultura de precisión está transformando la agricultura tradicional en prácticas más modernas y eficientes. Esta tendencia, junto con la entrada de nuevos jugadores en el mercado, está generando una mayor competencia e innovación, contribuyendo al rápido crecimiento del sector. En conclusión, el notable crecimiento en el sector de Agricultura y Agricultura de Precisión refleja una rápida evolución impulsada por avances tecnológicos y una demanda creciente de soluciones eficientes y

sostenibles. Este dinamismo tiene un impacto significativo en la forma en que se gestiona y optimiza la producción agrícola a nivel global.

Por otro lado, el crecimiento en el ámbito de las ciudades inteligentes está siendo impulsado por varios factores interrelacionados. Uno de los principales motores es la creciente urbanización global, que está presionando a las ciudades para que optimicen sus infraestructuras y servicios públicos. La necesidad de gestionar de manera más eficiente el tráfico, la energía, los residuos y otros recursos urbanos está fomentando la adopción de tecnologías inteligentes. Los avances tecnológicos en el IoT y la inteligencia artificial están permitiendo la integración de sistemas inteligentes que mejoran la toma de decisiones y la eficiencia operativa en tiempo real. Esto incluye la implementación de sensores inteligentes, plataformas de análisis de datos y soluciones en la nube, que facilitan la monitorización y gestión de diferentes aspectos de la vida urbana.

Además, el apoyo gubernamental y las inversiones tanto públicas como privadas en proyectos de ciudades inteligentes están jugando un papel crucial en este crecimiento. Muchos gobiernos están lanzando iniciativas para modernizar las infraestructuras urbanas con el fin de mejorar la sostenibilidad y la calidad de vida en las ciudades, lo que a su vez impulsa el crecimiento en este sector. La demanda de soluciones sostenibles y la presión por reducir el impacto ambiental también están llevando a las ciudades a adoptar tecnologías que promuevan la eficiencia energética y la gestión inteligente de los recursos, contribuyendo de manera significativa al crecimiento del mercado de ciudades inteligentes.

Podemos concluir que tanto la agricultura de precisión como las ciudades inteligentes están experimentando un crecimiento notable, impulsado por avances tecnológicos y una creciente demanda de soluciones eficientes y sostenibles. Estos sectores están transformando la manera en que gestionamos nuestros recursos, tanto en el ámbito agrícola como en el urbano, con un impacto significativo en la sostenibilidad y la eficiencia global. Las cifras de negocio en el sector de las tecnologías de información geográfica reflejan un panorama de crecimiento robusto, impulsado por la creciente demanda, la integración de IoT, la diversificación de aplicaciones, las innovaciones tecnológicas y la adopción de modelos basados en la nube. El notable crecimiento en sectores como la agricultura de precisión y las ciudades inteligentes destaca el impacto transformador de las TIG en diversas áreas. Empresas e inversores tienen la oportunidad de aprovechar estas tendencias emergentes para contribuir al desarrollo continuo del mercado de TIG.

SISTEMAS DE APOYO A LA TOMA DE DECISIONES

En la era contemporánea, la gestión de infraestructuras y servicios ha evolucionado significativamente con la irrupción de tecnologías inteligentes, comúnmente referidas como aplicaciones *smart* o inteligentes. Estas innovaciones tecnológicas están transformando cómo las ciudades y las organizaciones administran sus recursos, optimizan sus operaciones y mejoran la calidad de vida de sus ciudadanos. La convergencia de diversas tecnologías emergentes, como el Internet de las Cosas, la inteligencia artificial, el big data, y los sistemas de información geográfica, ha permitido desarrollar soluciones más eficientes, sostenibles y resilientes.

Una aplicación inteligente, se puede definir como un sistema de software integrado que utiliza tecnologías avanzadas como el IoT, IA, aprendizaje automático, big data y SIG para recopilar, procesar y analizar datos en tiempo real. El objetivo principal es optimizar la gestión, operación y toma de decisiones en diversas infraestructuras y servicios. Estas aplicaciones representan una convergencia de múltiples disciplinas tecnológicas para crear soluciones eficientes, adaptativas y sostenibles. Durante este capítulo describiremos los componentes de los sistemas de apoyo a la decisión y ejemplos de casos de uso.

En este capítulo describiremos los fundamentos de los sistemas de apoyo a la toma de decisiones y aplicaciones inteligentes.

4.1. Componentes y Características de una Aplicación Inteligente

En la era digital actual, las aplicaciones inteligentes, o "smart", están transformando la manera en que interactuamos con la tecnología y nuestro entorno. Esta sección explora los componentes fundamentales que componen una aplicación inteligente.

1. **Sensores y Actuadores:** Los sensores y actuadores son componentes fundamentales en las aplicaciones inteligentes. Los sensores recopilan datos del entorno físico, como temperatura, humedad, presión y flujo, mientras que los actuadores ejecutan

acciones controladas en respuesta a estos datos. Los sensores IoT proporcionan una visibilidad continua y detallada de las condiciones operativas, permitiendo la detección temprana de problemas y la optimización de los recursos (Gubbi et al., 2013).

2. **Redes de Comunicación:** La infraestructura de comunicación es esencial para la transmisión de datos entre sensores, actuadores y sistemas centrales. Tecnologías como Wi-Fi, LTE, 5G y protocolos específicos de IoT como LoRaWAN permiten el intercambio de datos en tiempo real. Estas redes deben ser robustas y seguras para asegurar la integridad y la disponibilidad de la información (Zanella et al., 2014).
3. **Plataformas de Big Data:** Las plataformas de big data almacenan y gestionan grandes volúmenes de datos heterogéneos, permitiendo su procesamiento y análisis eficiente. Según (Gantz et al., 2012), el big data es esencial para manejar la creciente cantidad de información generada por dispositivos IoT y otros sistemas, proporcionando una base para el análisis avanzado y la toma de decisiones basada en datos (Russell et al., 2016).
4. **Inteligencia Artificial y Aprendizaje Automático:** La inteligencia artificial y el aprendizaje automático permiten el análisis de datos para identificar patrones, hacer predicciones y tomar decisiones automatizadas. Los algoritmos de IA pueden analizar grandes conjuntos de datos para descubrir perspectivas que de otro modo serían imperceptibles. El aprendizaje automático, en particular, permite a los sistemas mejorar su rendimiento a lo largo del tiempo al aprender de los datos históricos (Russell et al., 2016).
5. **Sistemas de Información Geográfica:** Los SIG integran y analizan datos espaciales y geográficos, proporcionando un contexto espacial y una visualización de datos en mapas y otras representaciones geográficas. Esta capacidad es crucial para la gestión de infraestructuras distribuidas geográficamente, como redes de transporte y sistemas de agua y alcantarillado. De acuerdo con Michael F Goodchild, 2013, los SIG juegan un papel vital en la planificación y gestión urbana al facilitar la comprensión espacial de los datos.
6. **Interfaz de Usuario (UI):** La interfaz de usuario permite a los usuarios interactuar con el sistema, visualizar datos, configurar operaciones y tomar decisiones basadas en la información procesada. Las interfaces intuitivas y amigables son cruciales para asegurar que los usuarios puedan aprovechar al máximo las capacidades del sistema.

En cuanto a las características esenciales que definen una aplicación inteligente, explorando cómo estas innovaciones permiten a las aplicaciones anticiparse a las necesidades del usuario, adaptarse en tiempo real y ofrecer experiencias altamente personalizadas, destacamos:

1. **Conectividad:** Capacidad de interconectar múltiples dispositivos y sistemas para el intercambio de datos en tiempo real (Perera et al., 2014).

2. Automatización: Implementación de procesos automatizados para la toma de decisiones y la ejecución de acciones sin intervención humana constante. Inteligencia: Uso de algoritmos de IA para análisis predictivo, detección de anomalías y optimización de operaciones. Adaptabilidad: Capacidad de ajustar operaciones y respuestas en función de los cambios en el entorno y los datos recopilados.
3. Interactividad: Provisión de interfaces intuitivas para la interacción del usuario con el sistema, acceso a datos en tiempo real y recepción de alertas y recomendaciones.
4. Sostenibilidad: Optimización del uso de recursos (energía, agua, materiales) para reducir el impacto ambiental y mejorar la eficiencia operativa (Zanella et al., 2014).

4.2. Introducción a los Sistemas de Apoyo a la Decisión

En el contexto actual de rápida evolución tecnológica, los Sistemas de Apoyo a la Decisión (DSS, por sus siglas en inglés, *Decision Support Systems*) han emergido como herramientas cruciales para mejorar la eficiencia y efectividad en la toma de decisiones en diversos sectores. Estos sistemas combinan datos, modelos analíticos y herramientas de visualización para proporcionar a los tomadores de decisiones una visión más clara y fundamentada de los problemas complejos que enfrentan. Esta sección explora los fundamentos, aplicaciones y beneficios de los DSS, así como sus desafíos y tendencias futuras.

Desde sus inicios en las décadas anteriores, la gestión inteligente ha evolucionado significativamente, pasando de sistemas simples de monitoreo a plataformas avanzadas de gestión predictiva y adaptativa. Los progresos en hardware, software y conectividad han permitido la integración de múltiples fuentes de datos, lo que ha dado lugar a entornos digitales inteligentes y altamente interconectados (Gartner, 2021; Zook, 2017).

La relación entre los Sistemas de Soporte a la Decisión y las aplicaciones inteligentes es una de complementariedad y sinergia. Mientras que las aplicaciones inteligentes proporcionan datos en tiempo real, análisis avanzados y automatización, los DSS ofrecen un marco estructurado para la toma de decisiones informadas y estratégicas. Juntos, estos sistemas mejoran significativamente la gestión de infraestructuras y servicios, optimizando recursos, aumentando la eficiencia operativa y mejorando la capacidad de respuesta a emergencias. La integración de ambas tecnologías representa un avance crucial hacia una gestión más inteligente, eficiente y sostenible de nuestras ciudades y recursos. De hecho la línea entre ambas aplicaciones cada vez es más sutil y se tiende a simplificar el conjunto de ambas directamente como aplicación inteligente.

4.2.1. Fundamentos de los Sistemas de Apoyo a la Decisión

Un DSS es un sistema interactivo basado en ordenadores que ayuda a los tomadores de decisiones a utilizar datos, modelos y tecnología para resolver problemas no estructurados o semi-estructurados. Estos sistemas se caracterizan por su capacidad para integrar grandes volúmenes de datos y proporcionar análisis avanzados mediante

modelos matemáticos y estadísticos.

Componentes Principales

1. Base de Datos: Almacena datos relevantes y necesarios para el análisis. Incluye tanto datos internos como externos.
2. Modelos de Decisión: Conjunto de herramientas analíticas y modelos matemáticos que facilitan el procesamiento de datos y la generación de escenarios.
3. Interfaz de Usuario: Facilita la interacción entre el usuario y el sistema, permitiendo la entrada de datos, la ejecución de modelos y la visualización de resultados.

4.2.2. Beneficios de los DSS y desafíos

La implementación de DSS ofrece múltiples beneficios, entre los cuales se destacan:

1. Mejora en la Toma de Decisiones: Proporcionan análisis detallados y modelos predictivos que permiten a los tomadores de decisiones evaluar diferentes escenarios y elegir la mejor opción.
2. Aumento de la Eficiencia: Automatizan el procesamiento de grandes volúmenes de datos, reduciendo el tiempo y los costos asociados a la toma de decisiones.
3. Flexibilidad y Adaptabilidad: Pueden ajustarse a diferentes contextos y necesidades, adaptándose rápidamente a cambios en el entorno o en los objetivos de la organización.
4. Transparencia y Justificación: Facilitan la documentación y justificación de decisiones mediante la trazabilidad de los datos y modelos utilizados.

A pesar de sus beneficios, la implementación de los DSS enfrenta varios desafíos que deben ser considerados:

1. Integración de Datos: La integración de datos provenientes de diversas fuentes y formatos puede ser compleja y requerir significativos recursos técnicos.
2. Calidad de los Datos: La efectividad de un DSS depende de la calidad de los datos utilizados. Datos incompletos o erróneos pueden llevar a decisiones incorrectas.
3. Adopción por Parte de los Usuarios: La resistencia al cambio y la falta de familiaridad con la tecnología pueden dificultar la adopción de DSS por parte de los usuarios.
4. Seguridad y Privacidad: La gestión y protección de datos sensibles es un aspecto crítico, especialmente en sectores como el de la salud.

4.2.3. Tendencias Futuras en los DSS

El futuro de los DSS está estrechamente vinculado con los avances en tecnologías emergentes como la inteligencia artificial (IA), el aprendizaje automático y la analítica avanzada. Algunas tendencias destacadas incluyen:

1. Integración con IA y ML: La incorporación de algoritmos de IA y ML permitirá a los DSS aprender de los datos históricos, mejorar continuamente sus modelos y proporcionar recomendaciones más precisas.
2. Analítica Predictiva y Prescriptiva: Los DSS evolucionarán para no solo predecir futuros escenarios, sino también para recomendar acciones específicas que maximicen los resultados deseados.
3. Interfaz de Usuario Avanzada: Las interfaces de usuario se volverán más intuitivas y accesibles, utilizando tecnologías como la realidad aumentada (AR) y la realidad virtual (VR) para mejorar la interacción y la visualización de datos.
4. DSS Móviles: Con el aumento de la movilidad y la conectividad, los DSS serán accesibles desde dispositivos móviles, permitiendo a los tomadores de decisiones acceder a la información y realizar análisis en tiempo real desde cualquier lugar.

4.3. Áreas de aplicaciones de los DSS y las Soluciones Inteligentes

Dentro de las áreas de desarrollo destacamos las siguientes

1. Ciudades Inteligentes: Las ciudades inteligentes emplean sensores IoT y redes de comunicación avanzadas para recopilar datos en tiempo real sobre tráfico, calidad del aire, consumo de energía y otros indicadores clave. La analítica de estos datos permite la optimización de la planificación urbana, la mejora de la movilidad y el fomento de la sostenibilidad ambiental. Investigaciones recientes subrayan que el análisis de datos en tiempo real puede mejorar significativamente la calidad de vida urbana mediante una gestión más eficiente de los recursos (Chuvienco, 1996; Michael F. Goodchild, 2007).
2. Gestión de Emergencias y Seguridad Pública: Los SIG son herramientas cruciales en la gestión de emergencias, proporcionando una plataforma para una respuesta más rápida y coordinada ante desastres naturales y eventos críticos. La visualización de datos espaciales permite identificar áreas de riesgo y coordinar recursos de manera eficiente durante situaciones de crisis. La capacidad de modelar escenarios y simular respuestas es vital para una gestión efectiva en contextos de emergencia (A. M. MacEachren, 1995; Peng et al., 2003).
3. Gestión de Tráfico y Movilidad Urbana: La gestión del tráfico urbano es crucial para reducir la congestión y mejorar la movilidad. Las soluciones basadas en IoT, como sensores de tráfico y sistemas de gestión de semáforos inteligentes, permiten monitorear y optimizar el flujo vehicular en tiempo real. Estas tecnologías contribuyen a una movilidad urbana más eficiente y a la reducción de tiempos de viaje (Y. e. a. Huang, 2019; X. Li et al., 2021).
4. Eficiencia Energética y Gestión de Recursos: Las ciudades inteligentes implementan sistemas de gestión energética avanzada para optimizar el consumo de energía en edificios públicos y privados. Utilizando datos de consumo y análisis predictivo,

estas soluciones permiten reducir costos energéticos y minimizar la huella de carbono urbana. La integración de tecnologías de eficiencia energética contribuye a la sostenibilidad y la resiliencia urbana (Gao, 2020; Y. e. a. Zhou, 2018).

5. Servicios Públicos y Calidad Ambiental: La calidad del agua, el aire y la gestión de residuos son componentes clave en la sostenibilidad urbana. Tecnologías como la monitorización remota de la calidad del agua y la gestión inteligente de residuos ayudan a mantener entornos urbanos limpios y saludables. La implementación de estas tecnologías mejora la calidad de vida de los residentes y fomenta prácticas ambientales sostenibles (J. e. a. Wang, 2019; Boulif, 2021).
6. Seguridad y Vigilancia: Los sistemas de vigilancia inteligente, basados en cámaras de seguridad conectadas a redes IoT y análisis de imágenes, permiten una respuesta rápida ante emergencias y la prevención del crimen. Estas soluciones mejoran la seguridad pública mientras protegen la privacidad de los ciudadanos. La integración de tecnologías de vigilancia y análisis de datos contribuye a una gestión más eficaz de la seguridad urbana (Klein, 2020; O'Neill et al., 2021).
7. Aplicaciones Tecnológicas en la Gestión de Recursos Hídricos y ciclo integral del agua: La gestión eficiente de los recursos hídricos es esencial para garantizar el suministro adecuado de agua potable, la gestión adecuada de aguas residuales y la protección de los recursos hídricos. Este capítulo examina diversas aplicaciones tecnológicas que mejoran la gestión de aguas, con un enfoque en Sistemas de Información Geográfica, el Internet de las Cosas (IoT) y tecnologías avanzadas de monitoreo ambiental.

Las aplicaciones inteligentes y DSS son herramientas fundamentales en la gestión de recursos hídricos, ya que proporcionan capacidades avanzadas para la visualización, análisis y gestión de datos espaciales relacionados con el agua. Las aplicaciones de SIG en la gestión de recursos hídricos incluyen:

- Modelización Hidrológica: Los SIG permiten la modelización hidrológica detallada, que es esencial para simular el ciclo del agua, predecir caudales de ríos y gestionar embalses. Estos modelos ayudan a entender los patrones de flujo y a planificar la gestión del agua en función de las variaciones estacionales y climáticas (Michael F. Goodchild, 2007; Koster, 2010).
- Zonificación de Cuencas Hidrográficas: Los SIG son utilizados para la delimitación y caracterización de cuencas hidrográficas. Mediante el análisis espacial, es posible identificar las áreas de captación de agua, evaluar el impacto de las actividades humanas y facilitar una gestión integrada de los recursos hídricos. Esto contribuye a una planificación más eficiente y sostenible del uso del agua (A. M. MacEachren, 1995).
- Tecnologías IoT en el Monitoreo de Calidad del Agua. El Internet de las Cosas ha revolucionado el monitoreo de la calidad del agua al permitir la integración de sensores inteligentes en cuerpos de agua y sistemas de distribución. Estas tecnologías proporcionan datos en tiempo real sobre diversos parámetros

de calidad del agua, lo que es fundamental para la gestión y protección de los recursos hídricos. Las aplicaciones de IoT en el monitoreo de calidad del agua incluyen:

- **Sensores de Calidad del Agua:** La instalación de sensores inteligentes en cuerpos de agua superficiales y subterráneos permite medir parámetros clave como niveles de contaminación, pH, oxígeno disuelto y temperatura. Esta información es crucial para detectar y responder a la contaminación y otros problemas de calidad del agua (Peng et al., 2003; C. Zhang et al., 2022).
- **Gestión de Redes de Distribución:** El monitoreo continuo de la presión y el flujo en las redes de distribución de agua potable mediante tecnologías IoT permite la detección temprana de fugas y la optimización de la operación de la red. Esto mejora la eficiencia del suministro de agua y reduce las pérdidas (Chen, 2018; Ali, 2021).
- **Optimización de Recursos y Gestión Sostenible** La tecnología también desempeña un papel crucial en la optimización de los recursos hídricos y la promoción de prácticas de gestión sostenible. Las aplicaciones tecnológicas en este ámbito incluyen:
- **Desalinización y Reutilización:** Las tecnologías avanzadas de desalinización y reutilización de aguas residuales tratadas son fundamentales para aumentar el suministro de agua en regiones con escasez. Estas tecnologías permiten convertir agua de mar en agua potable y reutilizar aguas residuales para diversas aplicaciones (Elimelech et al., 2011; Y. e. a. Wang, 2022).
- **Gestión de Inundaciones:** La utilización de modelos de inundación y sistemas de alerta temprana ayuda a mitigar el riesgo de inundaciones en áreas vulnerables. Estos sistemas permiten prever eventos de inundación y activar medidas de protección para minimizar los daños (Mason, 2016; Merz, 2020).

4.4. Ejemplos y Casos de Estudio

A continuación exponemos casos de aplicaciones inteligentes integrando DSS que hemos seleccionado por diversas localizaciones geográficas.

4.4.1. Aplicaciones de Ciudades Inteligentes en Asia

Caso de Singapur: La Ciudad Inteligente. Singapur es uno de los líderes mundiales en la implementación de tecnologías de ciudad inteligente. Su iniciativa "Smart Nation" busca utilizar la tecnología para mejorar la vida de sus ciudadanos en diversas áreas, incluyendo la movilidad, la salud y la sostenibilidad ambiental.

1. **Movilidad Inteligente:** Singapur ha implementado un sistema de transporte público inteligente que utiliza datos en tiempo real para gestionar el tráfico y reducir la congestión. Los autobuses y trenes están equipados con sensores que monitorean

su ubicación y estado, lo que permite a los operadores optimizar las rutas y horarios. Según [Tang et al. \(2016\)](#), el manejo de la movilidad inteligente en Singapur ha sido fundamental para reducir la congestión y mejorar la eficiencia del transporte público.

2. Salud Inteligente: La nación ha desarrollado plataformas de telemedicina y dispositivos wearables que monitorean la salud de los ciudadanos, permitiendo una atención médica más personalizada y eficiente. [Phua et al. \(2012\)](#) describen cómo las tecnologías de salud inteligentes están transformando la atención médica en Singapur, haciendo que el acceso y la gestión de la salud sean más eficientes.
3. Sostenibilidad Ambiental: Singapur también se enfoca en la gestión inteligente de recursos, con proyectos como la gestión inteligente del agua y la energía, utilizando IoT para monitorear el consumo y detectar fugas o desperdicios. [W. Y. B. Lim et al. \(2019\)](#) destacan la importancia de las ciudades inteligentes en la sostenibilidad, señalando cómo las tecnologías inteligentes ayudan a manejar los recursos de manera más eficiente.

4.4.2. Aplicaciones de Ciudades Inteligentes en Europa

Ámsterdam: Innovación y Sostenibilidad. Ámsterdam ha sido reconocida como una de las ciudades más inteligentes de Europa gracias a su enfoque en la innovación y la sostenibilidad. La ciudad ha implementado una serie de proyectos piloto que sirven como modelo para otras ciudades.

1. Infraestructura Inteligente: Ámsterdam utiliza sensores en sus puentes y canales para monitorear el estado estructural y prevenir colapsos. Estos sensores proporcionan datos en tiempo real que ayudan a las autoridades a planificar el mantenimiento preventivo. [Kortuem et al. \(2013\)](#) discuten cómo los objetos inteligentes son bloques de construcción esenciales para el Internet de las Cosas, destacando su aplicación en infraestructuras urbanas.
2. Energía Sostenible: La ciudad ha desarrollado un programa de redes eléctricas inteligentes (smart grids) que optimiza la distribución de electricidad y fomenta el uso de energías renovables. Los hogares y edificios están equipados con medidores inteligentes que permiten un uso más eficiente de la energía. [Kok et al. \(2005\)](#) presentan PowerMatcher, un sistema multiagente para el control de infraestructuras eléctricas, subrayando su impacto en la gestión energética.
3. Movilidad Verde: Ámsterdam promueve el uso de bicicletas y vehículos eléctricos, con una infraestructura de carga ampliamente disponible y rutas diseñadas específicamente para ciclistas. Además, la ciudad utiliza sistemas de gestión de tráfico que reducen las emisiones de carbono. [Givoni et al. \(2010\)](#) abordan la integración del transporte y la práctica, señalando cómo las ciudades inteligentes pueden promover modos de transporte más sostenibles.

4.4.3. Aplicaciones de Ciudades Inteligentes en América del Norte

Caso de Nueva York: Innovación en la Gran Manzana. En Nueva York se ha implementado diversas iniciativas de ciudad inteligente para abordar los desafíos urbanos y mejorar la vida de sus ciudadanos. Destacamos:

1. Seguridad Pública: La ciudad ha desarrollado un sistema de vigilancia inteligente que utiliza cámaras y sensores conectados a una red centralizada para monitorear áreas públicas y detectar actividades sospechosas en tiempo real. Este sistema mejora la capacidad de respuesta de las fuerzas del orden. [Dinev et al. \(2006\)](#) examinan los modelos de cálculo de privacidad en transacciones de comercio electrónico, proporcionando una base para entender las implicaciones de la vigilancia inteligente.
2. Transporte Inteligente: Nueva York ha introducido sistemas de gestión del tráfico que utilizan datos en tiempo real para optimizar los semáforos y reducir la congestión. Además, la ciudad cuenta con una extensa red de transporte público que incluye autobuses y trenes equipados con tecnología avanzada para mejorar la eficiencia. [L. Zhang et al. \(2019\)](#) exploran el impacto de las tecnologías de ciudades inteligentes en el uso del transporte público, subrayando los beneficios de una gestión de tráfico optimizada.
3. Resiliencia Climática: En respuesta a los crecientes desafíos del cambio climático, Nueva York ha implementado proyectos de infraestructura verde que incluyen techos verdes y sistemas de gestión de aguas pluviales para reducir las inundaciones y mejorar la calidad del aire. [Rosenzweig et al. \(2010\)](#) destacan cómo las ciudades están liderando el camino en la acción contra el cambio climático, y Nueva York es un ejemplo claro de estos esfuerzos.

4.4.4. Aplicaciones de Ciudades Inteligentes en América Latina

Caso de Curitiba, Brasil: Sostenibilidad y Planificación Urbana. Curitiba, es un ejemplo destacado en América Latina de cómo la planificación urbana inteligente puede transformar una ciudad. Destacando las siguientes iniciativas:

1. Transporte Público Eficiente: La ciudad es conocida por su sistema de autobuses de tránsito rápido (BRT), que ha sido modelo para muchas otras ciudades. Este sistema utiliza carriles exclusivos para autobuses y estaciones diseñadas para acelerar el embarque y desembarque de pasajeros. Según [Godard \(2013\)](#), el sistema BRT de Curitiba ha mejorado significativamente la movilidad urbana y ha reducido las emisiones de carbono.
2. Gestión de Residuos: Curitiba ha implementado programas innovadores de gestión de residuos que fomentan el reciclaje y la recolección eficiente de basura. Los ciudadanos son incentivados a separar sus residuos, y los camiones de basura están equipados con tecnología para optimizar las rutas de recolección. [A. Fernández](#)

(2014) discute cómo la gestión inteligente de residuos en Curitiba ha contribuido a la sostenibilidad urbana.

3. Espacios Verdes y Sostenibilidad: La ciudad ha creado numerosos parques y áreas verdes que no solo mejoran la calidad de vida, sino que también actúan como sumideros de carbono. Además, estos espacios están diseñados para mitigar las inundaciones mediante la absorción de agua de lluvia. Oliveira et al. (2010) señalan que el enfoque de Curitiba en la creación de espacios verdes es un modelo para otras ciudades que buscan mejorar su resiliencia ambiental.

REVISIÓN DE SOLUCIONES INFORMÁTICAS PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE INFRAESTRUCTURAS Y SERVICIOS INTELIGENTES

En la era digital actual, la gestión de infraestructuras y servicios urbanos ha evolucionado significativamente, impulsada por la proliferación de tecnologías avanzadas y la creciente demanda de ciudades más inteligentes, sostenibles y eficientes. A medida que las poblaciones urbanas continúan expandiéndose, los desafíos asociados con la administración de recursos, el tráfico, la energía, el agua, la seguridad y otros aspectos críticos de la vida urbana se han vuelto más complejos. Para abordar estos desafíos, las soluciones informáticas juegan un papel central, proporcionando plataformas integradas que permiten a las ciudades y organizaciones gestionar, optimizar y coordinar sus operaciones de manera más eficaz y con una visión holística.

En este capítulo destacaremos algunas de las soluciones informáticas para la gestión integral de infraestructuras y servicios inteligentes más importantes.

5.1. Soluciones informáticas para la gestión

Las soluciones informáticas para la gestión de infraestructuras y servicios inteligentes son herramientas robustas diseñadas para soportar la planificación, implementación y mantenimiento de sistemas que están en el núcleo de las ciudades y organizaciones modernas. Estas plataformas van más allá de la simple automatización; permiten la interconexión y la interoperabilidad de múltiples sistemas, facilitando la recolección, análisis y visualización de datos en tiempo real. Al integrar datos de diversas fuentes, como sensores IoT, dispositivos móviles, cámaras de seguridad y sistemas de gestión existentes, estas soluciones permiten a los administradores tomar decisiones informadas y proactivas, mejorando la eficiencia operativa y reduciendo costos. A lo largo de este capítulo haremos un recorrido sobre algunas soluciones informáticas existentes para las ciudades inteligentes.

A continuación mencionamos una selección de soluciones informáticas para la gestión integral de infraestructuras y servicios inteligentes:

1. Plataformas de Gestión de Ciudades Inteligentes:

- Cisco Smart Cities: Cisco ofrece soluciones para conectar y gestionar diferentes aspectos de las ciudades inteligentes, incluyendo tráfico, seguridad pública y gestión de edificios. Su plataforma ayuda a mejorar la eficiencia operativa y a reducir costos mediante el uso de datos y análisis avanzados (Cisco, 2024).
- IBM Intelligent Operations Center: Esta plataforma integra datos de diferentes fuentes para gestionar y optimizar el funcionamiento de las infraestructuras urbanas. Permite a las ciudades mejorar la eficiencia en áreas como el tráfico, el transporte público y la gestión de recursos (IBM, 2024).

2. Gestión del Tráfico y Transporte Inteligente:

- SYNCHRO (de Bentley Systems): SYNCHRO es una solución de gestión del tráfico y la infraestructura de transporte que permite la planificación y simulación de proyectos de transporte para optimizar el flujo vehicular y reducir la congestión (Systems, 2024).
- Waze for Cities: Waze proporciona datos en tiempo real sobre el tráfico y las condiciones de las carreteras. Su plataforma para ciudades ayuda a gestionar y optimizar el tráfico urbano mediante la integración de datos de la comunidad de usuarios (Waze, 2024).

3. Gestión de Energía y Recursos:

- Schneider Electric EcoStruxure: Esta plataforma ofrece soluciones integradas para la gestión de energía y automatización en edificios, plantas industriales y redes eléctricas. Permite el monitoreo en tiempo real y la optimización de la eficiencia energética (Electric, 2024).
- Siemens Desigo CC: Desigo CC es un sistema de gestión para edificios que integra la supervisión y el control de sistemas de HVAC, iluminación, seguridad y energía, permitiendo una gestión eficiente de las infraestructuras de edificios inteligentes (Siemens, 2024).

4. Gestión del Agua y Saneamiento:

- Sensus Smart Water: Sensus proporciona soluciones para la gestión inteligente del agua, incluyendo medidores inteligentes y plataformas de análisis de datos para optimizar el uso del agua y mejorar la eficiencia en la gestión de recursos hídricos (Sensus, 2024).
- Veolia Water Technologies: Ofrece soluciones de gestión para el tratamiento y la distribución del agua, utilizando tecnología avanzada para monitorear y controlar el suministro de agua y la calidad del saneamiento (Technologies, 2024).

5. Gestión de Edificios Inteligentes:

- Johnson Controls Metasys: Metasys es un sistema de gestión de edificios que permite la integración y el control de sistemas de HVAC, iluminación,

seguridad y otros servicios en edificios inteligentes, optimizando su operación y eficiencia (Controls, 2024).

- Honeywell Building Management Solutions: Honeywell ofrece plataformas para la gestión de edificios que integran sistemas de energía, seguridad y confort para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de los edificios (Honeywell, 2024).

6. Seguridad Pública y Gestión de Emergencias:

- Genetec Security Center: Genetec proporciona una plataforma unificada para la gestión de video vigilancia, control de acceso y análisis de datos, diseñada para mejorar la seguridad pública y la gestión de emergencias en las ciudades (Genetec, 2024).
- Axon (anteriormente Taser): Axon ofrece soluciones para la gestión de datos de seguridad pública, incluyendo cámaras corporales, sistemas de gestión de pruebas y análisis para mejorar la seguridad y la eficiencia en la respuesta a emergencias (Axon, 2024).

7. Automatización y Control Industrial:

- Rockwell Automation FactoryTalk: FactoryTalk es una plataforma para la automatización y control industrial que proporciona herramientas para la supervisión, análisis y optimización de procesos industriales, contribuyendo a la creación de fábricas inteligentes (Automation, 2024).
- GE Digital Predix: Predix es una plataforma de análisis industrial que ayuda a las empresas a monitorear y optimizar el rendimiento de sus activos y procesos industriales mediante el uso de datos y análisis avanzados (Digital, 2024).

8. Plataformas de Análisis de Datos y Inteligencia Artificial basadas en IoT:

- Google Cloud IoT: Google ofrece soluciones para la gestión y análisis de datos provenientes de dispositivos IoT, permitiendo a las ciudades y empresas implementar soluciones inteligentes basadas en datos en tiempo real (Cloud, 2024).
- Microsoft Azure IoT: Azure IoT proporciona herramientas y servicios para conectar, gestionar y analizar datos de dispositivos inteligentes, facilitando la creación de aplicaciones y soluciones para la gestión de infraestructuras inteligentes (Azure, 2024).

5.2. Tecnología FIWARE: Una Plataforma para el Desarrollo de Aplicaciones Inteligentes

FIWARE es una plataforma abierta concebida para fomentar la innovación y facilitar el desarrollo de aplicaciones inteligentes en diversos sectores. Su origen se remonta a 2011, cuando fue lanzada como parte del programa de investigación e innovación

Horizonte 2020 de la Unión Europea. La iniciativa surgió con la intención de impulsar la competitividad de las empresas europeas en el ámbito de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC), proporcionando una infraestructura común y estandarizada para la creación de servicios avanzados. Destacamos especialmente FIWARE, ya que en esta tesis presenta una implicación directa en esta tecnología.

5.2.1. Principios y Objetivos de FIWARE

FIWARE se basa en la utilización de estándares y APIs abiertas, un principio fundamental que promueve la interoperabilidad entre diferentes plataformas y proveedores. Esta estrategia evita la dependencia de proveedores específicos y permite una integración fluida de datos y servicios de múltiples fuentes. La adopción de estándares abiertos es crucial para la creación de un ecosistema flexible y adaptable, capaz de soportar una amplia gama de aplicaciones y servicios (González, 2019), (P. Fernández, 2022).

FIWARE ha sido financiado predominantemente a través de proyectos auspiciados por la Comisión Europea, complementado en menor medida por iniciativas y colaboraciones provenientes del sector industrial privado.

En particular, FIWARE obtuvo una parte significativa de su financiación inicial a través del Séptimo Programa Marco (FP7) de la Comisión Europea, seguido por el programa Horizonte 2020. Estos programas, orientados a la investigación e innovación en el ámbito de la Unión Europea, proporcionaron los recursos financieros esenciales para el desarrollo y la expansión de la plataforma FIWARE.

Además, la plataforma ha contado con el apoyo financiero y logístico de entidades privadas mediante asociaciones y colaboraciones estratégicas. Estas sinergias con el sector privado han sido cruciales para la promoción y adopción de FIWARE en diversos sectores industriales.

En 2016, se estableció la FIWARE Foundation, una organización sin fines de lucro encargada de la gestión del desarrollo y la adopción de la plataforma FIWARE. La financiación de la Fundación FIWARE proviene de membresías, donaciones y la participación en proyectos financiados tanto por entidades públicas como privadas.

Dentro de los principios de FIWARE, destacamos los siguientes puntos fundamentales:

1. **Estándares Abiertos:** FIWARE se basa en la utilización de estándares y APIs abiertas, un principio fundamental que promueve la interoperabilidad entre diferentes plataformas y proveedores. Esta estrategia evita la dependencia de proveedores específicos y permite una integración fluida de datos y servicios de múltiples fuentes. La adopción de estándares abiertos es crucial para la creación de un ecosistema flexible y adaptable, capaz de soportar una amplia gama de aplicaciones y servicios (González, 2019; P. Fernández, 2022).
2. **Arquitectura Orientada a Servicios (SOA):** La plataforma FIWARE adopta una arquitectura orientada a servicios (SOA), que fomenta la modularidad y la reutilización de componentes. Los servicios en FIWARE se exponen a través de APIs

estándar, lo que facilita su integración en aplicaciones existentes y permite la creación de soluciones flexibles y escalables. Esta arquitectura facilita la adaptación y expansión de aplicaciones sin necesidad de realizar cambios drásticos en el sistema subyacente (Valverde, 2020; Hu, 2021).

3. Contexto y Gestión de Datos: Un componente central de FIWARE es el Context Broker, que gestiona y distribuye datos contextuales en tiempo real. El Context Broker permite la captura, almacenamiento y consulta de datos generados por sensores y otros dispositivos IoT. Este componente es crucial para aplicaciones que requieren información en tiempo real para tomar decisiones informadas. El enfoque en la gestión del contexto permite a FIWARE soportar aplicaciones que dependen de la integración de datos diversos y dinámicos (Perkins, 2019; Miranda, 2023). FIWARE tiene como objetivo principal simplificar y acelerar el desarrollo de aplicaciones inteligentes mediante la provisión de una infraestructura abierta y componentes de software reutilizables. Los objetivos específicos de FIWARE incluyen:
4. Interoperabilidad: Facilitar la integración y la interoperabilidad de diferentes sistemas y servicios a través de APIs estandarizadas. Innovación Abierta: Promover la innovación abierta mediante el acceso libre y gratuito a herramientas y componentes de software de alta calidad. Escalabilidad: Permitir el desarrollo de aplicaciones que puedan escalar fácilmente para manejar grandes volúmenes de datos y usuarios. Comunidad y Ecosistema: Fomentar una comunidad activa de desarrolladores y un ecosistema de partners que contribuyan al crecimiento y la evolución de la plataforma.

5.2.2. Componentes Principales de FIWARE

Los componentes principales son los bloques fundamentales sobre los cuales se construyen las aplicaciones FIWARE. Desde el Context Broker, que actúa como el núcleo para la gestión de información contextual, hasta herramientas avanzadas para el análisis de grandes volúmenes de datos, cada componente está diseñado para abordar desafíos específicos en la creación de soluciones inteligentes.

La plataforma ofrece un entorno completo para el desarrollo, despliegue y comercialización de aplicaciones, respaldado por una comunidad activa de desarrolladores y organizaciones. Este ecosistema colaborativo no solo impulsa la evolución continua de FIWARE, sino que también facilita la adopción de estas tecnologías en diversos contextos industriales y sociales, promoviendo una transformación digital sostenible y efectiva.

A continuación, se describen en detalle los componentes principales de FIWARE, explorando su funcionalidad, aplicaciones y cómo se integran para proporcionar soluciones inteligentes completas y adaptables. En la Figura 5.1 puede verse un esquema de sus componentes y arquitectura.

1. Context Broker: El Context Broker es el componente central de FIWARE, encargado de gestionar la información de contexto en tiempo real. Su principal funcionali-

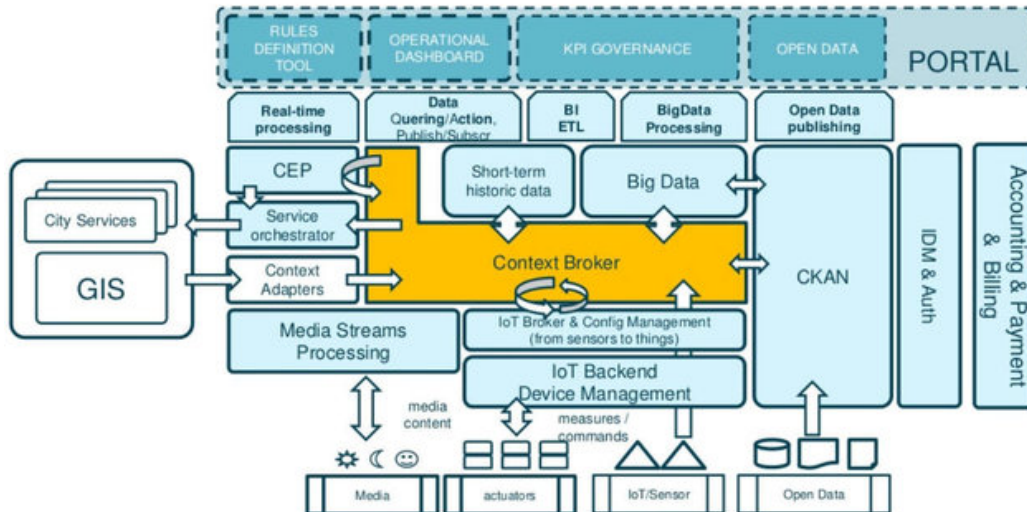


Figura 5.1: Esquema de los componentes y arquitectura de FIWARE. (FIWARE, 2018)

dad es permitir la recolección, actualización y consulta de datos de contexto de múltiples fuentes de manera coherente y eficiente. El Context Broker actúa como un intermediario que facilita la comunicación entre diferentes aplicaciones y servicios, proporcionando un punto centralizado para el intercambio de información (Rodríguez, 2021; P. Fernández, 2022).

2. NGS-LD: FIWARE utiliza la especificación NGS-LD (Next Generation Service Interfaces - Linked Data) como el estándar para la gestión de contexto. NGS-LD define un modelo de datos unificado y una API RESTful que permite la interoperabilidad y la integración de datos entre diferentes sistemas y dispositivos. Esta especificación es crucial para asegurar que los datos de contexto sean accesibles y utilizables por diversas aplicaciones dentro del ecosistema FIWARE.
3. IoT Agent: El IoT Agent es un componente esencial para la integración de dispositivos IoT con la plataforma FIWARE. Su principal objetivo es traducir los protocolos de comunicación específicos de los dispositivos IoT en un formato compatible con el Context Broker, facilitando así la incorporación de datos de dispositivos IoT en las aplicaciones FIWARE. El IoT Agent se comunica con el Context Broker a través de la API NGS-LD, asegurando que los datos de los dispositivos IoT se puedan almacenar, consultar y actualizar en tiempo real. Esta integración permite que las aplicaciones FIWARE accedan a datos en vivo de sensores y actuadores, facilitando el desarrollo de soluciones inteligentes y reactivas. El IoT Agent soporta una variedad de protocolos de comunicación utilizados comúnmente por dispositivos IoT, incluyendo:
 - MQTT (Message Queuing Telemetry Transport): Un protocolo ligero de mensajería diseñado para conexiones con limitaciones de ancho de banda.
 - CoAP (Constrained Application Protocol): Un protocolo de transferencia de datos optimizado para dispositivos con recursos limitados.
 - HTTP/HTTPS: Protocolo estándar de comunicación web utilizado por mu-

chos dispositivos IoT modernos.

4. **Big Data Analysis:** El componente de Big Data Analysis en FIWARE proporciona herramientas y servicios para el análisis de grandes volúmenes de datos. Estas herramientas permiten a las aplicaciones realizar análisis complejos, descubrir patrones y tendencias, y extraer información valiosa a partir de los datos recolectados. El componente de Big Data Analysis se integra estrechamente con otros componentes de FIWARE, como el Context Broker y el Data Storage. Esta integración permite que los datos recolectados y almacenados sean fácilmente accesibles para análisis avanzado, mejorando la capacidad de las aplicaciones para tomar decisiones informadas basadas en datos. Algunas de las herramientas y servicios clave incluidos en el componente de Big Data Analysis son:

- **Apache Hadoop:** Un marco de software de código abierto que permite el procesamiento distribuido de grandes conjuntos de datos.
- **Apache Spark:** Una plataforma de procesamiento de datos rápida y general que facilita el análisis de datos en tiempo real y en batch.
- **Elasticsearch:** Un motor de búsqueda y análisis de datos distribuido que permite búsquedas rápidas y eficientes en grandes volúmenes de datos.

5. **Identity Management (Keyrock):** El componente de Identity Management, conocido como Keyrock, es responsable de gestionar la autenticación y autorización de los usuarios dentro de la plataforma FIWARE. Keyrock asegura que solo los usuarios autorizados puedan acceder a los datos y servicios, proporcionando un marco robusto para la gestión de identidades. Destacan las siguientes características:

- **Gestión de Usuarios y Roles:** Keyrock permite la creación y administración de usuarios, roles y permisos. Los administradores pueden definir roles específicos con permisos detallados, asegurando que los usuarios solo puedan acceder a los recursos necesarios para sus funciones.
- **OAuth 2.0 y OpenID Connect:** Keyrock implementa protocolos estándar como OAuth 2.0 y OpenID Connect para la autenticación y autorización. Estos protocolos proporcionan un método seguro y estandarizado para gestionar el acceso a los recursos y servicios dentro de la plataforma FIWARE.

6. **Data Storage:** El componente de Data Storage ofrece soluciones de almacenamiento persistente para datos históricos. Este componente es crucial para aplicaciones que necesitan almacenar grandes volúmenes de datos a largo plazo y recuperar información de manera eficiente. El componente de Data Storage se integra con el Context Broker, permitiendo que los datos de contexto se almacenen de manera persistente. Esta integración facilita el análisis histórico de datos y la generación de informes, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones basada en datos. FIWARE proporciona diferentes tipos de almacenamiento para satisfacer diversas necesidades:

- **Relational Databases (SQL):** Bases de datos relacionales como PostgreSQL y

MySQL para almacenamiento estructurado de datos.

- NoSQL Databases: Soluciones NoSQL como MongoDB para almacenamiento de datos no estructurados y semi-estructurados.
- Time-Series Databases: Bases de datos de series temporales como CrateDB e InfluxDB, optimizadas para almacenar y consultar datos de eventos temporales.

7. Security Components: FIWARE incluye una serie de componentes de seguridad diseñados para proteger los datos y asegurar la integridad y confidencialidad de la información. FIWARE implementa protocolos de seguridad estándar como HTTPS y TLS para asegurar la comunicación entre componentes y servicios. Estos protocolos garantizan que los datos sean transmitidos de manera segura y que las conexiones sean protegidas contra interceptaciones y ataques. Estos componentes incluyen:

- Wilma PEP Proxy: Un componente que actúa como un proxy de control de acceso, asegurando que todas las solicitudes a los servicios FIWARE sean autenticadas y autorizadas.
- AuthZForce: Un motor de autorización que evalúa políticas de acceso detalladas y toma decisiones sobre el acceso a los recursos.

8. Desarrollo y Despliegue: FIWARE proporciona un entorno robusto para el desarrollo y despliegue de aplicaciones inteligentes. Los desarrolladores pueden utilizar herramientas como Docker y Kubernetes para crear, empaquetar y desplegar sus aplicaciones de manera eficiente.

- Docker: Docker permite a los desarrolladores crear contenedores que encapsulan sus aplicaciones y todas sus dependencias. Esto asegura que las aplicaciones puedan ejecutarse de manera consistente en diferentes entornos, simplificando el proceso de desarrollo y despliegue.
- Kubernetes: Kubernetes proporciona un marco para la orquestación y gestión de contenedores Docker a escala. Con Kubernetes, los desarrolladores pueden desplegar aplicaciones en clusters de servidores, asegurando alta disponibilidad, escalabilidad y resiliencia.

El ecosistema FIWARE está compuesto por una comunidad activa de desarrolladores, empresas y organizaciones que contribuyen al crecimiento y evolución de la plataforma. Este ecosistema incluye:

- FIWARE Lab: Un entorno de experimentación que proporciona acceso a los componentes de FIWARE y permite a los desarrolladores probar y validar sus aplicaciones en un entorno real.
- FIWARE Marketplace: Un mercado donde los desarrolladores y empresas pueden ofrecer sus soluciones basadas en FIWARE, facilitando la comercialización y adopción de nuevas aplicaciones.

5.2.3. Beneficios de FIWARE

A continuación se citan algunos de los beneficios de FIWARE:

1. **Interoperabilidad:** Uno de los principales beneficios de FIWARE es su capacidad para facilitar la integración de diferentes sistemas y servicios a través de estándares abiertos. La interoperabilidad es esencial para construir aplicaciones que puedan operar en entornos heterogéneos y colaborar con diversos sistemas. Esto permite a los desarrolladores crear soluciones más completas y flexibles, capaces de adaptarse a una variedad de escenarios y necesidades (Boulif, 2021; M. F. Goodchild et al., 2022).
2. **Flexibilidad y Escalabilidad:** La arquitectura orientada a servicios de FIWARE proporciona flexibilidad y escalabilidad en el desarrollo de aplicaciones. La modularidad de los componentes permite a los desarrolladores adaptar y escalar sus soluciones de manera eficiente, respondiendo a cambios en los requisitos o al crecimiento de la demanda. Esta capacidad de adaptación es crucial para aplicaciones que deben evolucionar con el tiempo o enfrentar desafíos cambiantes (C. Zhang et al., 2022; Hsu, 2023).
3. **Desarrollo Ágil de Aplicaciones:** FIWARE facilita el desarrollo rápido de prototipos y aplicaciones mediante el uso de APIs y componentes predefinidos. La disponibilidad de herramientas y servicios estandarizados permite a los desarrolladores construir y probar aplicaciones de manera ágil, reduciendo el tiempo necesario para llevar una idea desde el concepto hasta la implementación. Este enfoque ágil es particularmente valioso en entornos de innovación rápida y desarrollo continuo (Keenan, 2020; X. e. a. Yang, 2021).

5.2.4. Casos de Uso de Fiware

FIWARE ofrece casos de usos diversos, hemos seleccionado los principales que citamos a continuación.

1. **Ciudades Inteligentes:**

FIWARE ha sido ampliamente adoptada en el ámbito de las ciudades inteligentes, donde se utiliza para gestionar infraestructuras urbanas, mejorar la movilidad, optimizar el uso de recursos y mejorar la calidad de vida de los ciudadanos. La plataforma permite la integración de múltiples fuentes de datos en tiempo real, facilitando la toma de decisiones informadas por parte de las autoridades municipales.

En la ciudad de Málaga, España, FIWARE se ha utilizado para desarrollar una plataforma de gestión urbana que integra datos de sensores de tráfico, calidad del aire y consumo energético. Esta plataforma permite a las autoridades monitorizar y gestionar la ciudad de manera más eficiente y sostenible. La integración de sensores de tráfico permite a las autoridades monitorizar el flujo vehicular en tiempo real. Esto facilita la gestión del tráfico, la reducción de congestiones y

la mejora de la movilidad urbana. Además, los datos recopilados pueden ser utilizados para optimizar las rutas de transporte público y reducir los tiempos de viaje.

La plataforma también integra sensores de calidad del aire, que proporcionan datos en tiempo real sobre los niveles de contaminación. Estos datos son cruciales para implementar políticas de reducción de emisiones y proteger la salud pública. Las autoridades pueden tomar medidas proactivas, como restringir el tráfico en ciertas áreas o promover el uso de transporte público y bicicletas. FIWARE también permite la monitorización del consumo energético en edificios públicos y privados. Esto ayuda a identificar patrones de consumo y oportunidades para mejorar la eficiencia energética. La plataforma puede sugerir acciones para reducir el consumo energético, como la optimización del uso de la iluminación y la climatización. En resumen, la implementación de FIWARE en Málaga ha mejorado la calidad de vida de los ciudadanos, promovido la sostenibilidad y optimizado la eficiencia operativa de la ciudad.

2. Agricultura Inteligente:

FIWARE facilita la implementación de soluciones de agricultura inteligente, también conocida como agricultura de precisión. Estas soluciones utilizan datos de sensores IoT para monitorizar en tiempo real las condiciones del suelo y del clima, optimizando el uso de recursos como el agua y los fertilizantes para aumentar la productividad y reducir el impacto ambiental.

En una finca agrícola en España, FIWARE se ha utilizado para desarrollar un sistema de monitorización y control que integra sensores de humedad del suelo, temperatura y humedad del aire, y niveles de nutrientes. Sensores de humedad del suelo proporcionan datos en tiempo real sobre el contenido de agua en diferentes áreas de la finca. Estos datos permiten a los agricultores ajustar los sistemas de riego de manera precisa, asegurando que las plantas reciban la cantidad adecuada de agua sin desperdiciar recursos.

Sensores de temperatura y humedad del aire ayudan a monitorizar las condiciones climáticas, lo que es crucial para la toma de decisiones sobre el riego, la aplicación de fertilizantes y la protección de cultivos. Los datos climáticos en tiempo real permiten ajustar las operaciones agrícolas de acuerdo con las condiciones actuales. Sensores de nutrientes en el suelo proporcionan información sobre los niveles de nutrientes disponibles para las plantas. Esta información permite a los agricultores aplicar fertilizantes de manera precisa, optimizando el crecimiento de los cultivos y minimizando el impacto ambiental de los fertilizantes químicos. La implementación de FIWARE en la finca agrícola ha aumentado la productividad, reducido el impacto ambiental y promovido prácticas agrícolas sostenibles.

3. Salud Inteligente:

FIWARE también desempeña un papel importante en la transformación digital del sector salud. Plataformas basadas en FIWARE permiten la gestión eficiente de datos médicos, facilitando el acceso a la información por parte de profesionales de

la salud y mejorando la coordinación de la atención al paciente.

En un hospital de Italia, FIWARE se ha utilizado para desarrollar una plataforma de gestión de datos médicos que integra historiales clínicos electrónicos, datos de dispositivos médicos y sistemas de gestión hospitalaria. La plataforma permite la integración y acceso a historiales clínicos electrónicos (EHR), proporcionando a los profesionales de la salud una visión completa y actualizada de la historia médica de cada paciente. Esto mejora la precisión del diagnóstico y la calidad de la atención. La integración de datos de dispositivos médicos permite la monitorización en tiempo real de pacientes, tanto en el hospital como en sus hogares. Los datos de monitorización, como la frecuencia cardíaca, la presión arterial y los niveles de glucosa, se transmiten al sistema central, donde pueden ser analizados por los médicos para detectar posibles problemas y ajustar el tratamiento.

La plataforma también facilita la gestión operativa del hospital, incluyendo la asignación de camas, la gestión de inventarios y la coordinación del personal. Los datos en tiempo real permiten una mejor planificación y respuesta a las necesidades emergentes, mejorando la eficiencia operativa del hospital. En resumen, la implementación de FIWARE en el hospital ha mejorado la atención al paciente, optimizado la eficiencia operativa y permitido una monitorización remota más efectiva.

4. Industria 4.0:

FIWARE se utiliza en la Industria 4.0 para mejorar la eficiencia y la flexibilidad de los procesos de manufactura mediante la integración de datos de sensores IoT y sistemas de automatización. La plataforma permite la monitorización en tiempo real y el control de procesos industriales, facilitando la toma de decisiones basada en datos.

En una fábrica automotriz en Alemania, FIWARE se ha utilizado para desarrollar un sistema de monitorización y control de la producción que integra datos de sensores en las líneas de montaje, sistemas de control de calidad y gestión de inventarios. Sensores en las líneas de montaje proporcionan datos en tiempo real sobre el estado de los equipos y el progreso de la producción. Estos datos permiten a los gerentes de producción monitorizar el rendimiento y detectar problemas de manera temprana, minimizando el tiempo de inactividad y mejorando la eficiencia operativa.

Sistemas de control de calidad integrados con FIWARE permiten la inspección automatizada de productos en diferentes etapas de la producción. Los datos de inspección se analizan en tiempo real para identificar defectos y garantizar que los productos cumplan con los estándares de calidad. La integración de sistemas de gestión de inventarios permite un seguimiento preciso de los materiales y componentes necesarios para la producción. Los datos en tiempo real sobre el uso de inventarios facilitan la planificación de la producción y aseguran que los materiales estén disponibles cuando se necesiten. En resumen, la implementación de FIWARE en la fábrica automotriz ha mejorado la eficiencia operativa, asegurado

la calidad del producto y optimizado la gestión de inventarios.

5. Gestión del Agua:

FIWARE se utiliza en la gestión del agua para optimizar el uso y la distribución de recursos hídricos. La plataforma permite la integración de datos de sensores de calidad y cantidad de agua, sistemas de distribución y datos meteorológicos, facilitando una gestión más eficiente y sostenible del agua.

En una empresa de suministro de agua en Francia, FIWARE se ha utilizado para desarrollar un sistema de monitorización y control que integra sensores de calidad del agua, medidores de consumo y datos meteorológicos. Sensores de calidad del agua en las redes de distribución proporcionan datos en tiempo real sobre parámetros como el pH, la turbidez y la presencia de contaminantes. Estos datos permiten a la empresa tomar medidas proactivas para mantener la calidad del agua y proteger la salud pública.

Medidores de consumo de agua proporcionan datos sobre el uso de agua en diferentes áreas. Estos datos se utilizan para optimizar la distribución de agua y asegurar que las demandas se satisfagan de manera eficiente. La plataforma también permite la detección temprana de fugas y la respuesta rápida para reducir pérdidas. La integración de datos meteorológicos permite a la empresa planificar la gestión del agua en función de las condiciones climáticas. Por ejemplo, en períodos de sequía, se pueden implementar medidas de conservación del agua y ajustar la distribución para asegurar un suministro continuo. En resumen, la implementación de FIWARE en la empresa de suministro de agua ha asegurado la calidad del agua, optimizado la eficiencia en la distribución y mejorado la sostenibilidad del uso del agua.

6. Puertos Marítimos Inteligentes:

FIWARE está revolucionando la gestión de puertos marítimos mediante la integración de tecnologías inteligentes que optimizan las operaciones portuarias, mejoran la seguridad y reducen el impacto ambiental. La plataforma FIWARE permite la recopilación y análisis de datos en tiempo real, facilitando la toma de decisiones informadas y la automatización de procesos críticos. Destacamos tres casos relevantes:

- El Puerto de Valencia ha implementado soluciones basadas en FIWARE para transformar su operativa y convertirse en un puerto inteligente. La iniciativa, conocida como "Valencia Port Authority (VPA) Smart Port)", integra una serie de componentes y servicios que mejoran la eficiencia y sostenibilidad del puerto. El puerto utiliza sensores y sistemas de seguimiento para monitorizar el tráfico de embarcaciones y vehículos en tiempo real. Los datos recopilados permiten gestionar mejor el flujo de tráfico, reducir congestiones y optimizar las operaciones de carga y descarga.

Sensores distribuidos en el puerto monitorizan la calidad del aire y del agua, proporcionando datos en tiempo real sobre niveles de contaminación y otros

parámetros ambientales. Estos datos permiten a las autoridades portuarias tomar medidas proactivas para proteger el medio ambiente y cumplir con las regulaciones. FIWARE facilita la implementación de sistemas inteligentes de gestión energética en el puerto, incluyendo el monitoreo del consumo de energía y la integración de fuentes de energía renovable. Estos sistemas ayudan a identificar áreas de mejora y a implementar medidas de eficiencia energética.

La plataforma FIWARE integra sistemas de videovigilancia y análisis de datos en tiempo real para mejorar la seguridad en el puerto. Los sistemas de seguridad incluyen cámaras, sensores de movimiento y sistemas de reconocimiento facial, que ayudan a detectar y responder rápidamente a incidentes de seguridad. En resumen, la implementación de FIWARE en el Puerto de Valencia ha mejorado la eficiencia operativa, asegurado el cumplimiento normativo, reducido costos, promovido la sostenibilidad y mejorado la seguridad.

- El Puerto de Amberes también ha adoptado soluciones basadas en FIWARE para mejorar sus operaciones y sostenibilidad. Esta implementación se centra en la integración de tecnologías IoT y análisis de datos para optimizar la logística y la gestión ambiental. El puerto utiliza sensores IoT y sistemas de gestión de datos para optimizar la logística y la gestión de carga. Estos sistemas permiten un seguimiento preciso de contenedores y mercancías, mejorando la eficiencia en el manejo de la carga y reduciendo errores. Además, el puerto implementa una red de sensores para monitorizar diversos parámetros ambientales, incluyendo calidad del aire, ruido y niveles de agua. Estos datos ayudan a las autoridades a gestionar el impacto ambiental de las operaciones portuarias y a tomar medidas correctivas cuando sea necesario.
- En el capítulo 6 se desarrollará el caso del puerto de la Luz, en Las Palmas de G.C.

SISTEMA DE GESTIÓN INTELIGENTE DE PUERTOS

Los puertos marítimos juegan un papel crucial como enlace entre las áreas costeras y las infraestructuras urbanas, facilitando tanto el comercio como el transporte de pasajeros. Con la proliferación del Internet de las Cosas y la implementación de nuevas redes de sensores, la cantidad de datos recopilados de los elementos naturales y artificiales del puerto ha aumentado significativamente en los últimos años. Este incremento en la recopilación de datos brinda una oportunidad sin precedentes para optimizar la gestión y operación de los puertos, pero también presenta grandes desafíos en cuanto a la adquisición, transferencia, almacenamiento, análisis de grandes volúmenes de datos y visualización de la información.

Los datos recolectados de las fuentes portuarias deben ser monitorizados continuamente para organizar y controlar las actividades en curso. Estas actividades son fundamentales para el desarrollo económico y social de la comunidad, facilitando el comercio, el transporte de bienes y personas, y la protección del medio ambiente, entre otros.

Este capítulo presenta y describe el sistema de gestión de puertos que forma parte de las contribuciones de esta tesis. Está basado en las publicaciones (Pablo Fernández et al., 2016), (Pablo Fernández et al., 2017) y (Pablo Fernández et al., 2018).

6.1. Aplicaciones de Gestión Portuaria

La gestión portuaria es esencial para asegurar la eficiencia operativa y la seguridad en los puertos marítimos, facilitando el movimiento de mercancías, pasajeros y actividades logísticas. Este capítulo explora cómo diversas tecnologías, incluyendo Sistemas de Información Geográfica, el Internet de las Cosas, y soluciones innovadoras en automatización, mejoran la gestión portuaria, asegurando una operación más segura y eficiente.

En la gestión portuaria, los SIG desempeñan un rol crucial al ofrecer herramientas avanzadas para la visualización, análisis y gestión de datos espaciales. Estas tecnologías permiten a los administradores portuarios supervisar y optimizar infraestructuras clave, como muelles, almacenes y vías de acceso marítimo. Las aplicaciones de SIG en la gestión portuaria incluyen:

1. **Planificación de Infraestructuras:** Los SIG facilitan la planificación y diseño de infraestructuras portuarias mediante el uso de modelos tridimensionales (3D) y análisis de redes. Estos modelos ayudan en la optimización del diseño y la ubicación de nuevas infraestructuras, asegurando que se adapten a las necesidades operativas y logísticas del puerto (Michael F. Goodchild, 2007; Y. e. a. Zhang, 2020). Además, la capacidad de visualizar en 3D permite una mejor comprensión del impacto ambiental y operativo de las nuevas construcciones.
2. **Gestión de Tráfico y Seguridad:** La implementación de sistemas de vigilancia basados en cámaras y sensores IoT, integrados con SIG, permite un monitoreo detallado del tráfico marítimo y terrestre en los puertos. Estas herramientas son esenciales para prevenir incidentes y mejorar la seguridad operativa. Los SIG permiten la visualización en tiempo real de datos relacionados con el tráfico y la seguridad, facilitando una respuesta rápida a situaciones críticas (A. M. MacEachren, 1995; X. Li et al., 2021). Esto incluye la detección temprana de posibles colisiones y la gestión eficiente de emergencias.

El IoT ha transformado la gestión portuaria mediante la integración de sensores inteligentes en equipos y activos portuarios, permitiendo la recopilación de datos en tiempo real sobre su estado y rendimiento. Esta tecnología es crucial para una gestión eficiente de los activos y la programación de mantenimientos preventivos. Las aplicaciones de IoT en la monitorización portuaria incluyen:

1. **Sensores de Contenedores:** Los sensores de contenedores proporcionan datos en tiempo real sobre la ubicación y las condiciones ambientales de los contenedores de carga. Esta información es vital para optimizar la logística, minimizar pérdidas y garantizar la integridad de la carga durante el tránsito (Peng et al., 2003; Y. e. a. Wang, 2022). Estos sensores también pueden detectar condiciones que podrían dañar la mercancía, como temperaturas extremas o humedad excesiva.
2. **Gestión de Flotas:** El uso de sistemas GPS y telemetría para rastrear y gestionar flotas de vehículos y embarcaciones en el puerto mejora la eficiencia operativa. Estos sistemas permiten el monitoreo continuo del estado y la ubicación de los activos, facilitando la coordinación y la toma de decisiones en tiempo real (Chen, 2018; L. e. a. Zhao, 2022). Además, proporcionan datos valiosos para el análisis de rendimiento y la planificación de rutas más eficientes.

La automatización de procesos logísticos en los puertos contribuye significativamente a mejorar la eficiencia operativa y reducir los tiempos de espera. Tecnologías como los sistemas de gestión de terminales (TOS) y los sistemas de planificación de recursos empresariales (ERP) son fundamentales para la optimización de diversas operaciones portuarias:

1. **Planificación de Cargas y Descargas:** La optimización de las operaciones de carga y descarga se logra mediante el uso de algoritmos avanzados de asignación y

programación. Estos sistemas permiten una planificación eficiente de las operaciones, reduciendo los tiempos de espera y aumentando la productividad (Chuvienco, 1996; X. Li et al., 2021). La automatización en esta área también minimiza el error humano y mejora la precisión en la manipulación de cargas.

2. Gestión de Inventarios: Los sistemas automatizados para la gestión de inventarios y el seguimiento de stocks en tiempo real son cruciales para minimizar el almacenamiento innecesario y mejorar la disponibilidad de productos. La integración de tecnologías de automatización facilita un control más preciso y eficiente de los inventarios (Z. e. a. Zhou, 2020; Kumar, 2023). Esto permite a los puertos mantener un flujo constante de mercancías sin interrupciones, optimizando el espacio de almacenamiento y reduciendo costos.

Ejemplos destacados de la implementación de estas tecnologías incluyen:

1. Puerto de Rotterdam, Países Bajos: El Puerto de Rotterdam ha implementado sistemas avanzados de gestión logística y análisis de datos para gestionar el tráfico de contenedores de manera eficiente. La utilización de estas tecnologías ha permitido una mejora significativa en la eficiencia operativa y una reducción de las emisiones de carbono. La integración de sistemas SIG y tecnologías de automatización ha sido clave en la optimización de las operaciones portuarias (Rotterdam Authority, 2021; Van der Meer, 2022). Estos avances han posicionado a Rotterdam como un líder en sostenibilidad y eficiencia portuaria.
2. Puerto de Singapur: El Puerto de Singapur es conocido por su uso avanzado de tecnologías IoT y análisis predictivo para la gestión de embarcaciones y carga. Estas tecnologías han sido fundamentales para prevenir cuellos de botella y optimizar las operaciones portuarias. La implementación de soluciones innovadoras ha permitido al puerto mantener su posición como uno de los más eficientes y dinámicos a nivel mundial (P. A. o. Singapore, 2023; J. e. a. Huang, 2023). La capacidad de predecir y reaccionar ante posibles problemas antes de que ocurran es una de las principales ventajas que Singapur ha logrado con estas tecnologías.

6.2. Proyecto de I+D. SmartPort en Las Palmas de Gran Canaria

Ubicado en las Gran Canaria, España, el puerto de Las Palmas es uno de los más relevantes de la costa occidental de África, sirviendo como punto de conexión entre África, Europa y América, además de ser una parada clave para muchas mercancías procedentes de Asia. El puerto de Las Palmas maneja más de 100 millones de contenedores y casi cuatro millones de viajeros cada año.

La entidad responsable del seguimiento, mantenimiento y toma de decisiones en este puerto es la Autoridad Portuaria de Las Palmas de Gran Canaria. Esta institución recibe información precisa sobre los buques cercanos, contenedores, datos meteorológicos y el estado del mar. Gran parte de esta información proviene de una red de sensores

desplegados por todo el puerto y sus alrededores. Estos grandes volúmenes de información suelen estar geolocalizados, lo que implica una gestión en el ámbito de los grandes datos geoespaciales, un desafío particular dentro del análisis de big data. Por lo tanto, se requiere una arquitectura computacional que permita a la Autoridad Portuaria recopilar, almacenar y visualizar los datos, además de realizar acciones reactivas basadas en las lecturas actuales.

Debido a su volumen, la agregación de datos recopilados por una red de sensores durante un largo período necesita ser procesada para asegurar su disponibilidad y escalabilidad. Los desafíos y complejidades inherentes a los grandes volúmenes de datos, su análisis y la importancia de sus representaciones gráficas se describen en diversos estudios recientes. En este contexto, surge el proyecto SmartPort, una plataforma web que integra herramientas para el análisis y visualización de la red de sensores del puerto de Las Palmas de Gran Canaria.

El proyecto de investigación y desarrollo SmartPort surge de un convenio de colaboración entre la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, la Autoridad Portuaria de Las Palmas de Gran Canaria y el programa FIWARE. Los objetivos de SmartPort son los siguientes:

1. Crear una arquitectura de *back-end* que procese y almacene de forma segura y escalable todos los datos entrantes de los sensores. Además, se necesita un módulo de análisis de datos para inferir información significativa del conjunto de datos, permitiendo el almacenamiento y la recuperación eficiente de información para su posterior procesamiento.
2. Implementar funcionalidades de alto nivel basadas en los datos proporcionados por los sensores meteorológicos y marinos. Estas funcionalidades deben influir positivamente en la toma de decisiones de la Autoridad Portuaria, ofreciendo notificaciones reactivas basadas en las lecturas de los sensores.
3. Desarrollar una aplicación de Internet enriquecida (*Rich Internet Application*, RIA) como interfaz del proyecto, proporcionando herramientas para gestionar y visualizar los datos de los sensores y acceso rápido a las lecturas actuales e históricas.
4. Crear un Sistema de Soporte de Decisiones que permita no solo monitorear y visualizar información, sino también mejorar significativamente la toma de decisiones.

La integración de estas tecnologías y enfoques no solo mejora la gestión y operatividad del puerto, sino que también incrementa la eficiencia en la toma de decisiones, contribuyendo así al desarrollo económico y social de la región. El uso de FIWARE y otras tecnologías emergentes en el proyecto SmartPort ejemplifica cómo los puertos pueden transformarse en puertos inteligentes, mejorando la sostenibilidad y competitividad a nivel global.

6.3. Entendiendo las Fuentes de Datos del Puerto Marítimo de Las Palmas de Gran Canaria

La gestión eficiente de un puerto marítimo tan importante como el de Las Palmas de Gran Canaria requiere un análisis exhaustivo y detallado de las diversas fuentes de datos disponibles. La naturaleza diversa y compleja de los datos provenientes del puerto hizo necesario un análisis previo al diseño de los componentes del sistema SmartPort. Por ello, hemos distinguido entre diferentes tipos de datos, categorizándolos en datos dinámicos y datos estáticos. A continuación, se detalla cómo se ha abordado esta clasificación y se ha diseñado una arquitectura eficiente y escalable a partir de estos datos.

6.3.1. Datos Estáticos

Los datos estáticos son aquellos que permanecen inalterables a lo largo del tiempo. En el contexto del puerto de Las Palmas, hemos digitalizado datos estáticos provenientes de diversas fuentes, como Google Earth y referencias de Infraestructuras de Datos Espaciales. Estos datos incluyen información sobre infraestructuras físicas como hoteles, restaurantes, cajeros automáticos, paradas de guaguas y farmacias. La digitalización de estos datos proporciona una base estable y consistente para el análisis y la toma de decisiones.

Los sensores ubicados en el puerto de Las Palmas están instalados en posiciones fijas. Esta característica permite almacenar de manera estática sus coordenadas geográficas, lo que facilita su gestión y consulta. A diferencia de los modelos más avanzados, como las Redes de Sensores Inalámbricos Móviles o *Mobile Wireless Sensor Aetwork*(MWSN), que requieren una lógica de control más compleja debido a su movilidad, los sensores fijos del puerto simplifican la tarea de monitorización y análisis.

6.3.2. Datos Dinámicos

Por otro lado, los datos dinámicos son aquellos que varían con el tiempo y suelen presentar una frecuencia de actualización regular. Estos datos son una de las principales fuentes de grandes volúmenes de información en el puerto de Las Palmas. Ejemplos de datos dinámicos incluyen los datos recopilados por boyas y sensores meteorológicos, los cuales suelen actualizarse cada tres minutos.

Los dispositivos que proporcionan estos datos dinámicos son:

1. Sensores Meteorológicos: Los sensores Geonica 41001, Geonica 05106 (Figura 6.1) y Geonica 52203 recopilan datos sobre temperatura, velocidad y dirección del viento, magnitud y dirección de las ráfagas, precipitaciones, presión atmosférica, tendencia de la presión atmosférica y humedad. Estos datos son cruciales para la monitorización ambiental y la toma de decisiones en tiempo real.

2. Sensores de Medición de Corrientes: Equipos como los de Aanderaa Instruments series 3791-3798 (Figura 6.2) y Geonica Datamar 2000C. Gracias a estos sensores podemos obtener los siguientes datos:

- Altura significativa de la ola (momento espectral de orden cero) [metros]
- Altura promedio del tercio más alto de las olas [metros]
- Altura promedio del 10 % de las olas máximas [metros]
- Altura máxima de la ola [metros]
- Periodo promedio de todas las olas [segundos]
- Periodo de pico de las olas [segundos]
- Periodo promedio de inclinación por el cero ascendente [segundos]
- Dirección media en el pico de la dirección de la ola [grados en el sentido de las agujas del reloj]
- Dispersión de la dirección de la ola en el pico de la energía [grados en el sentido de las agujas del reloj]
- Dirección promedio de donde provienen las olas [grados en el sentido de las agujas del reloj]
- Índice de direccionalidad [indicador personalizado]
- Presión de la columna de agua sobre el sensor [decibares]
- Velocidad orbital sobre la superficie del sensor [metros por segundo]
- Dirección de la corriente en la superficie del sensor [grados en el sentido de las agujas del reloj]
- Espectro de densidad de energía para la serie temporal [banda espectral]



Figura 6.1: Sensor Geonica 05106

3. Buques: El Sistema de Identificación Automática o *Automatic Identification System* (AIS) proporciona datos detallados sobre los buques, incluyendo parámetros como el nombre del buque, eslora, nacionalidad, tipo de operación, muelle de atraque, empresa, fecha de llegada, puerto de origen, código de puerto, tipo de buque, tránsito de crucero, código Lloyd, fecha de salida, bolardos, indicativo de llamada



Figura 6.2: Sensor Aandela 3791-3798

y puerto de destino. Estos datos son esenciales para la gestión del tráfico marítimo y la coordinación de actividades portuarias.

El AIS es una tecnología crucial para la navegación y seguridad marítima. Fue diseñado para facilitar la identificación de buques, la localización y la comunicación entre ellos y con las estaciones en tierra. Los datos transmitidos por AIS son utilizados tanto por las autoridades marítimas como por los propios operadores de los buques para mejorar la seguridad y eficiencia del tráfico marítimo.

El protocolo del sistema AIS define un conjunto de mensajes que son enviados por los barcos utilizando un transceptor VHF y posteriormente mostrados por sistemas de información ubicados tanto en los propios barcos como en estaciones en tierra. Estos mensajes contienen información crítica que puede ser utilizada para varios propósitos.

- Identificación y descubrimiento automático de la posición de barcos vecinos: El AIS permite a los buques identificar y monitorear automáticamente la posición y movimiento de otros barcos cercanos, lo que es esencial para la prevención de colisiones y la navegación segura.
- Complementación de sensores de radar para evitar colisiones entre barcos: El AIS complementa los sistemas de radar al proporcionar datos adicionales sobre la identificación y movimiento de otros buques, mejorando la capacidad de los operadores para tomar decisiones informadas y evitar colisiones.
- Monitoreo de flotas, por ejemplo, por las autoridades portuarias: Las autoridades portuarias y otras entidades de monitoreo pueden usar los datos del AIS

para supervisar y gestionar eficazmente las flotas, asegurando que los buques operen de manera segura y eficiente dentro de sus áreas de jurisdicción.

- Servicios de tráfico marítimo: Los servicios de tráfico marítimo utilizan el AIS para gestionar y coordinar el movimiento de buques en áreas congestionadas, como puertos y vías navegables estrechas, mejorando la fluidez y seguridad del tráfico marítimo.
- Rescate y seguridad marítima: En situaciones de emergencia, los datos del AIS son vitales para las operaciones de búsqueda y rescate, permitiendo a los equipos de rescate localizar rápidamente los buques en peligro y coordinar las operaciones de salvamento de manera más efectiva.

Además, el AIS también es utilizado en una variedad de aplicaciones adicionales, incluyendo:

- Supervisión ambiental: Monitoreo de buques que transportan materiales peligrosos para prevenir y responder a posibles incidentes ambientales.
- Investigación y análisis: Recopilación de datos para estudios de tráfico marítimo, patrones de navegación y comportamiento de flotas.
- Comercio y logística: Facilita la logística y operaciones comerciales al proporcionar datos precisos sobre la ubicación y el estado de los buques.
- Seguridad nacional: Utilizado por las fuerzas de seguridad y defensa para la vigilancia y protección de las fronteras marítimas.

El AIS es, por tanto, una herramienta multifacética que desempeña un papel vital en la seguridad, eficiencia y gestión del tráfico marítimo global, contribuyendo significativamente a la navegación moderna y la protección del medio ambiente marino.

6.4. Implementación de FIWARE en SmartPort

Una de las principales tecnologías usadas en SmartPort es FIWARE. Como se ha desarrollado en el capítulo 5, es un proyecto de código abierto destinado a crear aplicaciones inteligentes. Esta tecnología busca aprovechar las oportunidades que surgen de la nueva era de digitalización, provocada por la integración de las últimas tecnologías de Internet. El proyecto está financiado por la Comisión Europea en el marco de su programa Future Internet Public Private Partnership (FI-PPP), donde se coopera con empresas privadas del sector tecnológico para el desarrollo de tecnologías basadas en Internet.

La plataforma FIWARE proporciona muchos recursos tecnológicos. FIWARE se basa en elementos llamados *Generic Enablers* (GE), que ofrecen módulos reutilizables y compartidos que cubren una multiplicidad de áreas de uso en varios sectores.

6.5. Generic Enablers Utilizados en SmartPort

En este proyecto, SmartPort, nos basamos en los principios de la arquitectura backend del proyecto FIWARE, que se basa principalmente en dos módulos diferentes proporcionados por la tecnología FIWARE: **Orion Context Broker** y **Cosmos**.

6.5.1. Agente de Contexto de Orion

Un *Context Broker* (CB) permite la gestión de todo el ciclo de vida de la información de contexto, incluidos registros, actualizaciones, suscripciones y consultas. Utilizando el intermediario de contexto, es posible almacenar los elementos del contexto y administrarlos mediante actualizaciones y consultas. Además, un usuario puede suscribirse a información de contexto, recibiendo una notificación cuando se activa una condición.

Orion proporciona dos interfaces API REST: NGSIG9 y NGSIG10. Estas API permiten las siguientes operaciones:

1. NGSIG9: registrar contenido, descubrir la disponibilidad del contexto, suscribirse a la disponibilidad del contexto, actualizar la disponibilidad del contexto y cancelar la suscripción a la disponibilidad del contexto.
2. NGSIG10: actualizar contenido, consultar contenido, suscribirse a contenido, actualizar la suscripción y darse de baja del contenido.

6.5.2. Cosmos

Cosmos es la implementación de referencia de *Generic Enabler* para el almacenamiento y análisis de Big Data. Aunque la parte de *streaming* todavía está en la hoja de ruta del producto, la parte por lotes se ha desarrollado ampliamente mediante la adopción y la creación interna de herramientas como Hadoop.

Cosmos implementa una versión ligera basada en un clúster Hadoop compartido y se basa en OpenStack Sahara para aprovisionar clústeres de aplicaciones con uso intensivo de datos (Hadoop o Spark).

6.5.3. Cygnus

Cygnus se utiliza como conector entre el intermediario de contexto de Orion y Cosmos. Se basa en Flume, un servicio distribuido para recopilar, agregar y mover de manera eficiente grandes cantidades de datos de registro.

6.6. Arquitectura de Backend de SmartPort

En esta sección se explican los diferentes módulos back-end del proyecto SmartPort. El objetivo principal de estos módulos es almacenar flujos de datos provenientes de los sensores para su posterior consulta y análisis.

Comenzando con los datos estáticos, donde no se requiere una arquitectura compleja, en su mayoría necesitan una arquitectura de almacenamiento simple. Ese es el caso de los Sistemas de Gestión de Bases de Datos Relacionales.

Los datos son digitalizados por un operador mediante un Sistema de Información Geográfica. En nuestro caso, hemos utilizado Quantum GIS. El mismo SIG edita y almacena los datos en un RDBMS. El RDBMS elegido ha sido PostgreSQL con PostGIS, su extensión para la gestión de datos geográficos.

Los datos previamente almacenados se convierten al formato GeoJSON para poder mostrarlos en el visor. GeoJSON es un formato para la codificación de diferentes estructuras de datos geográficos, que soporta los siguientes tipos de geometría: Point, LineString, Polygon, MultiPoint, MultiLineString y MultiPolygon. Las listas de geometría están representadas por un tipo GeometryCollection.

El flujo de trabajo (ver Figura 6.3) cuando se trata de datos estáticos es el siguiente:

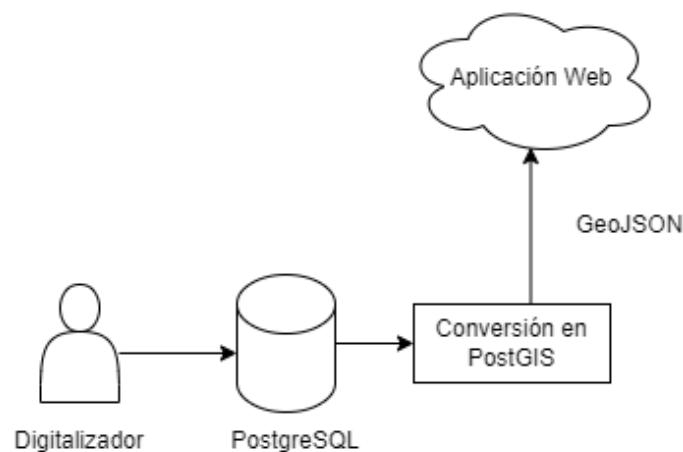


Figura 6.3: Arquitectura y flujo de la gestión de los datos estáticos

Al contrario que con los datos estáticos, una de las principales características de los datos de los sensores proporcionados en el puerto marítimo de Las Palmas es la frecuencia de actualización. Tiene un valor de frecuencia de tres minutos debido a la naturaleza de su ejecución. Esto implica el rápido crecimiento de la información almacenada en la base de datos, lo que implica que una base de datos tradicional potencialmente no podría satisfacer los requisitos de este proyecto.

Aquí es donde entra en juego FIWARE. Ha facilitado la implementación de nuevas arquitecturas debido a su interfaz modular con los GE. Una de sus mayores ventajas es la disminución del tiempo dedicado a la instalación y configuración del sistema.

Para obtener las últimas lecturas de cada sensor utilizamos el Orion GE. Orion proporciona un sistema de suscripción de sensores, que nos permite almacenar y consultar los últimos datos disponibles. Se realizó una capa de abstracción sobre Orion para simplificar las transacciones HTTP y permitir una interacción más ágil con la aplicación web. De esta forma, podemos generar consultas de datos simplificadas mediante solicitudes AJAX, reduciendo así la cantidad de cálculos realizados en el

cliente.

Gracias a las abstracciones e interfaces anteriores, una consulta simple nos permite recuperar datos de los sensores. Un ejemplo para obtener datos de los barcos sería:

`http://<<IP>>:<<Port>>/orion/query.html?sensorType=ship&sensorID=.&pattern=true`

Considerando que uno de los principales objetivos de SmartPort es obtener datos históricos del sensor, utilizamos Cosmos GE para lograrlo.

En nuestra aplicación, como se ve en la Figura 6.4, almacenamos los datos existentes en Orion y luego en Cosmos. Para lograr esta conexión, utilizamos Cygnus, que es un canal de flujo de datos distribuido y confiable.

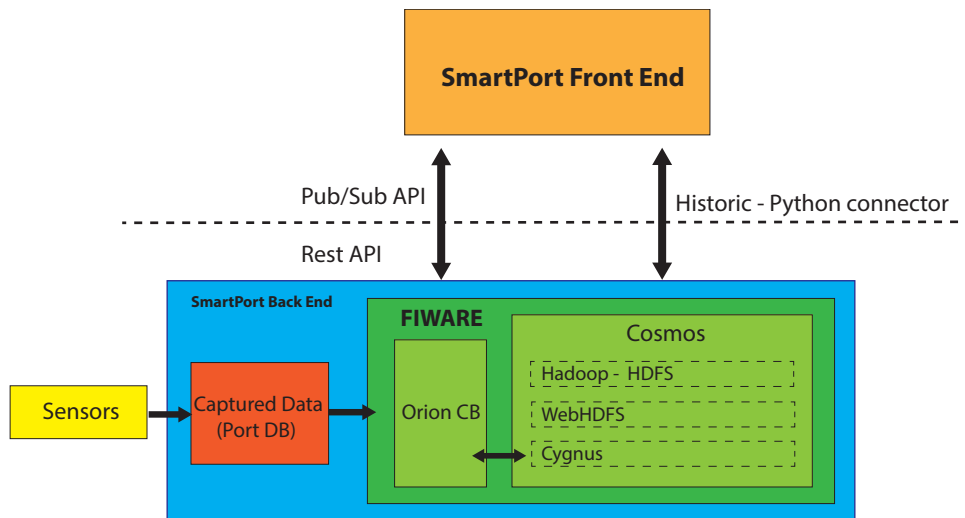


Figura 6.4: Arquitectura del back-end de SmartPort. (P. Fernández et al., 2016b)

Con esta información, para el AIS, el frontend de SmartPort renderiza diferentes modelos 3D basados en el tipo de barco y los escala según sus dimensiones (Fig. 6.5). A partir del posicionamiento, también podemos detectar la orientación del barco y replicarla en la representación del modelo.



Figura 6.5: Ejemplo de modelo 3D de un barco. (Pablo Fernández et al., 2017).

Para los datos dinámicos, como por ejemplo del AIS, el servicio alimenta el flujo con mensajes de texto AIVDM/AIVDO conocidos como sentencias. A continuación podemos ver un mensaje de ejemplo:

`!AIVDM,1,1,B,177KQJ5000G?t0K>RA1wUbN0TKH,0*5C`

En este punto, los mensajes son accesibles como datos de contexto en la instancia de Orion GE, lo que permite al frontend consultar fácilmente los datos de interés. La arquitectura completa del procesamiento AIS de SmartPort se muestra en la Fig. 6.6.

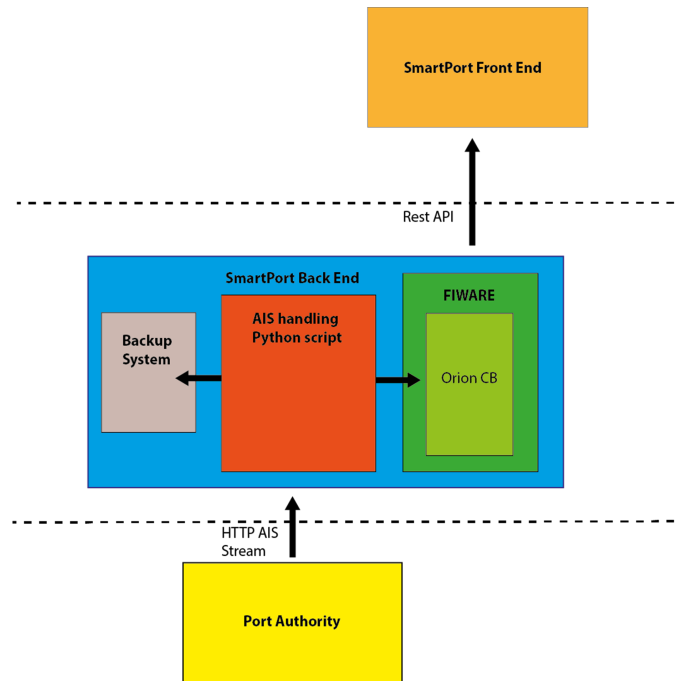


Figura 6.6: Esquema de la arquitectura para gestionar datos del AIS. (Pablo Fernández et al., 2017).

El tipo de mensajes depende de los datos que se están transmitiendo y de la categoría del barco que está transmitiendo, teniendo los barcos grandes un conjunto distinto de mensajes que los más pequeños.

Del flujo AIS, capturamos, entre otras variables, los siguientes datos:

- ID de la Organización Marítima Internacional (IMO)
- Origen
- Destino
- Tipo de barco
- Dimensiones del barco
- Última ubicación conocida
- Tiempo estimado de llegada
- Equipo de Terminal de Datos (DTE)
- Información de posicionamiento
- Tipo de mensaje
- Última transmisión

6.7. Escalabilidad del back-end de SmartPort

Una de las razones para adoptar un módulo de big data es garantizar la escalabilidad en el tiempo. La escalabilidad se refiere a la capacidad de un sistema para manejar

un aumento en la carga de trabajo, como un mayor volumen de datos o una mayor demanda de procesamiento, sin comprometer el rendimiento o la funcionalidad del sistema. Es una característica crucial para sistemas que deben crecer de manera eficiente y sin interrupciones a medida que se expanden las necesidades operativas.

La Autoridad Portuaria de Las Palmas de GC tiene previsto ampliar la red de sensores para dar soporte a diferentes proyectos mediante la instalación exponencialmente positiva de sensores adicionales al año. Haciendo una simulación, se estima que la red alcanzará 628 sensores a finales de 2024. Esta expansión subraya la importancia de adoptar soluciones de big data que puedan escalar adecuadamente para manejar el incremento de datos generado por la creciente red de sensores.

Año	Número de sensores	Datos Entrantes (Mb/Día)	Total de datos por año (Gb)	Acumulación de Datos (Gb)
2011	4	140	49.90	49.90
2012	4	140	49.90	99.80
2013	4	140	49.90	149.71
2014	4	140	49.90	199.61
2015	4	140	49.90	249.51
2016	4	140	49.90	299.41
2017	34	1190	424.17	723.58
2018	64	2240	798.44	1522.02
2019	94	3290	1172.71	2694.73
2020	124	4340	1546.97	4241.70
2021	186	6510	2320.46	6562.16
2022	279	9765	3480.69	10042.85
2023	419	14648	5221.03	15263.88
2024	628	21971	7831.55	23095.43

Tabla 6.1: Evolución de la acumulación de los datos en el tiempo según aumenta la red de sensores

La Tabla 6.1 muestra la evolución esperada de la cantidad total de datos recopilados al final de cada año. El ratio de datos entrantes por día pasará de 140 Mb/día en el periodo 2011-2015 a 21971 Mb/día en 2024.

Una vez finalizada la instalación de los sensores, la cantidad total esperada de datos almacenados por el sistema aumentará hasta 136.186,44 Gb a finales de 2024.

Dado que Hadoop está diseñado para manejar grandes volúmenes de datos, no ofrece un rendimiento óptimo con cantidades más pequeñas en comparación con un sistema de gestión de bases de datos relacionales. Una de las limitaciones de Hadoop es su baja velocidad de consulta en comparación con un RDBMS, debido a, entre otras causas a su modelo de programación MapReduce que explicamos a continuación.

6.7.1. El modelo MapReduce en Hadoop

MapReduce es un modelo de programación utilizado en Hadoop para el procesamiento distribuido de grandes conjuntos de datos. Su funcionamiento se organiza en dos fases principales: la fase de "Map" y la fase de "Reduce".

1. Fase Map: El sistema toma los datos de entrada y los divide en pequeños fragmentos que pueden ser procesados en paralelo. Cada fragmento se asigna a un nodo en el clúster de Hadoop, donde se ejecuta una función de mapeo. Esta función transforma la entrada en pares clave-valor, que constituyen una forma intermedia de los datos. Cada nodo procesa su parte del conjunto de datos de manera independiente, generando una lista de pares clave-valor como salida.
2. Fase intermedia: Una vez completada la fase de Map, los pares clave-valor intermedios son enviados a la fase de Reduce. Antes de llegar a esta fase, los datos son reorganizados o "barajados" (*shuffled*) de manera que todos los valores asociados a una misma clave se agrupen en el mismo nodo. Este proceso asegura que la fase de Reduce pueda operar de manera coherente sobre todas las instancias de cada clave.
3. Fase Reduce: Se aplica una función que toma cada clave y su conjunto de valores asociados, y los reduce a un resultado final, que suele ser una agregación, resumen o combinación de los valores.

El resultado de la fase de Reduce es el conjunto final de datos procesados, que pueden ser almacenados o utilizados para tareas posteriores.

El modelo MapReduce es altamente escalable, lo que permite que grandes volúmenes de datos sean procesados de manera eficiente en clústeres distribuidos. Esto se logra mediante la paralelización inherente a las fases de Map y Reduce, así como la capacidad del sistema para manejar fallos de nodos, redistribuyendo automáticamente las tareas en caso de fallos.

Sin embargo, al implementar Hadoop en el proyecto SmartPort, observamos tiempos de respuesta significativamente más altos, como se muestra en la Tabla 6.2 donde se comparan los tiempos de obtención de datos entre MySQL, PostgreSQL y Hadoop. Estos resultados nos llevaron a investigar las causas de estas latencias y a buscar soluciones, las cuales se discuten en las siguientes secciones.

	MySQL	PostgreSQL	Hadoop Estándar
Todos los datos de los mareógrafos	8.12	9.72	60.03
Un atributo ordenado por fecha	10.55	11.53	74.83

Tabla 6.2: Comparativa de tiempos entre diferentes sistemas

MapReduce, a pesar de su amplia adopción en el procesamiento distribuido de grandes volúmenes de datos, presenta diversas limitaciones que pueden impactar su eficiencia y aplicabilidad en ciertos contextos.

Uno de los problemas más destacados es la latencia intrínseca asociada con el modelo de procesamiento por lotes que utiliza. En MapReduce, cada fase de procesamiento (*Map y Reduce*) implica múltiples operaciones de lectura y escritura en disco. Esto introduce una latencia considerable, especialmente cuando se requieren resultados en tiempo real o casi en tiempo real. La dependencia de las operaciones de I/O en disco limita la eficiencia del sistema, convirtiéndolo en menos adecuado para aplicaciones que demandan procesamiento inmediato de datos.

El modelo MapReduce, aunque eficaz para el procesamiento de grandes volúmenes de datos en entornos distribuidos, presenta problemas significativos cuando se aplica a conjuntos de datos más pequeños. Uno de los problemas más críticos en este contexto es la latencia.

MapReduce está diseñado para manejar tareas de procesamiento por lotes en grandes volúmenes de datos distribuidos a lo largo de múltiples nodos en un clúster. Cada fase del proceso, desde la lectura de datos en la fase de Map hasta la escritura de los resultados en la fase de Reduce, involucra operaciones de entrada/salida en disco, así como la transferencia de datos entre nodos. Estos pasos introducen una latencia considerable.

Cuando se trata de conjuntos de datos pequeños, el tiempo necesario para coordinar estas operaciones distribuidas y realizar las múltiples etapas de procesamiento y comunicación puede superar el tiempo que se tardaría en procesar los mismos datos utilizando una base de datos tradicional o un sistema de procesamiento centralizado. En estos casos, las bases de datos tradicionales, que están optimizadas para realizar operaciones rápidas y eficientes en conjuntos de datos más pequeños, pueden ejecutar consultas y tareas de procesamiento con una latencia significativamente menor en comparación con MapReduce.

6.7.2. Arquitectura Lambda

La arquitectura Lambda es un enfoque de diseño para sistemas de procesamiento de datos en tiempo real que se caracteriza por su capacidad de manejar grandes volúmenes de datos y proporcionar análisis tanto en tiempo real como por lotes. Fue popularizada por Nathan Marz, el creador de Apache Storm autor de (Marz et al., 2015). Esta arquitectura combina lo mejor de los enfoques de procesamiento por lotes (batch processing) y procesamiento en tiempo real (stream processing). A continuación, se detalla su estructura y componentes principales:

Para manejar eficientemente tanto el análisis histórico como las necesidades de datos en tiempo real, se implementó una *Lambda Architecture* compuesta por tres capas diferenciadas:

1. **Capa de Lotes (Batch Layer):** Almacena todos los datos utilizando Hadoop, creando vistas inmutables para análisis posteriores.
2. **Capa de Servicio (Serving Layer):** Responde a las consultas de manera eficiente utilizando un RDBMS.

3. **Capa de Velocidad (Speed Layer):** Procesa los datos a medida que estos llegan, proporcionando una vista en tiempo real.

En la Figura 6.7 se puede ver un esquema de dicha arquitectura.

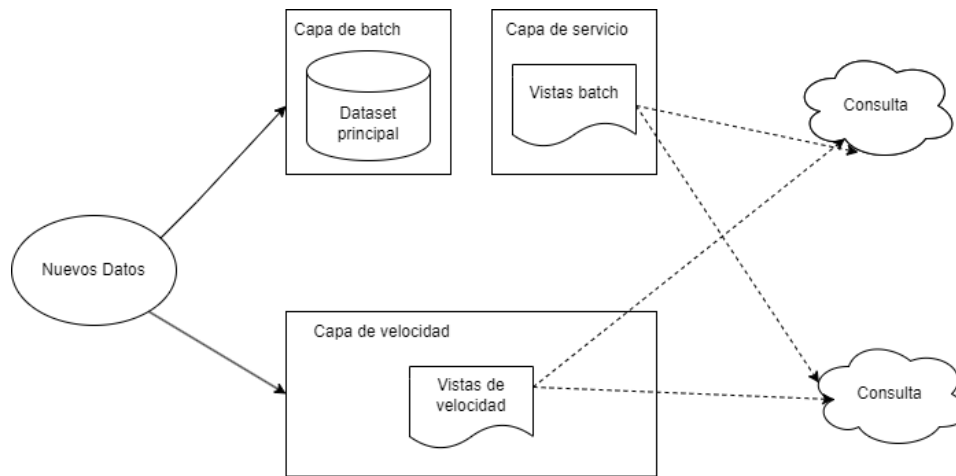


Figura 6.7: Esquema de la arquitectura Lambda

El funcionamiento de la arquitectura Lambda se puede resumir en las siguientes etapas:

1. **Ingesta de Datos:** Los datos entran en el sistema a través de la capa de ingesta. Estos datos son duplicados y enviados simultáneamente a la capa de procesamiento en tiempo real y a la capa de procesamiento por lotes. Esta duplicación asegura que tanto los sistemas de procesamiento en tiempo real como los de procesamiento por lotes tengan acceso a los mismos datos sin retrasos (Marz et al., 2015).
2. **Procesamiento en Tiempo Real:** La capa de procesamiento en tiempo real consume los datos inmediatamente, los procesa y almacena los resultados preliminares en la capa de almacenamiento. Estos resultados están disponibles para consultas casi instantáneamente, pero pueden ser imprecisos o parciales debido a la naturaleza rápida y a veces superficial del procesamiento en tiempo real (Kiran et al., 2015).
3. **Procesamiento por Lotes:** Los datos acumulados en la capa de ingesta también son procesados en intervalos regulares por la capa de procesamiento por lotes. Este procesamiento es más exhaustivo y preciso, ya que considera todos los datos disponibles hasta el momento del procesamiento. De esta manera, se pueden realizar análisis más detallados y corregir posibles errores del procesamiento en tiempo real (Kiran et al., 2015).
4. **Consolidación y Almacenamiento:** Los resultados del procesamiento en tiempo real y por lotes son consolidados en la capa de almacenamiento. Esto proporciona tanto vistas rápidas (de la capa de procesamiento en tiempo real) como vistas completas y precisas (de la capa de procesamiento por lotes), asegurando que los usuarios tengan acceso a datos actualizados y detallados (Zaharia et al., 2012).
5. **Consumo y Presentación:** Los usuarios finales o sistemas downstream acceden a los datos procesados a través de la capa de consumo y presentación, utilizando

APIs, dashboards o servicios de consulta. Esto permite una interacción flexible y eficiente con los datos procesados, facilitando la toma de decisiones informadas (Zaharia et al., 2012).

La arquitectura Lambda ofrece varias ventajas, como:

1. Latencia Baja y Alta Precisión: La arquitectura Lambda combina lo mejor de ambos mundos: respuestas rápidas con la capa de procesamiento en tiempo real y resultados precisos con la capa de procesamiento por lotes. Esto permite a las organizaciones responder rápidamente a eventos mientras se asegura de que los análisis detallados sean precisos (Marz et al., 2015).
2. Escalabilidad: La arquitectura Lambda es capaz de manejar grandes volúmenes de datos y escalar horizontalmente. Esto significa que se pueden añadir más recursos según sea necesario para gestionar incrementos en la carga de datos sin comprometer el rendimiento (Zaharia et al., 2012).
3. Flexibilidad: Permite el uso de diferentes tecnologías en cada capa, adaptándose a las necesidades específicas de procesamiento y almacenamiento. Por ejemplo, se pueden utilizar sistemas de mensajería en tiempo real como Kafka para la ingesta y herramientas como Hadoop para el procesamiento por lotes (Marz et al., 2015).

Además, también presenta algunos desafíos:

1. Complejidad: La implementación y el mantenimiento de una arquitectura Lambda pueden ser complejos debido a la necesidad de gestionar múltiples sistemas y capas. Cada componente debe ser configurado y monitoreado adecuadamente para asegurar su correcto funcionamiento (Kiran et al., 2015).
2. Consistencia: Asegurar la consistencia entre los resultados del procesamiento en tiempo real y por lotes puede ser un reto. Es necesario implementar mecanismos para reconciliar las diferencias y garantizar que los datos finales sean coherentes (Kiran et al., 2015).
3. Costos: La duplicación de datos y el procesamiento en ambas capas puede aumentar los costos operativos. Se requiere una infraestructura significativa para soportar las necesidades de almacenamiento y procesamiento de la arquitectura Lambda (Zaharia et al., 2012).

La complejidad y costo deben ser considerados cuidadosamente en el diseño y mantenimiento del sistema (Marz et al., 2015).

A pesar de estos desafíos, la arquitectura Lambda es una solución poderosa para sistemas que requieren un equilibrio entre latencia y precisión. Tras implementar una arquitectura basada en Lambda, se observó una notable mejora en los tiempos de obtención de datos, como se muestra en la Tabla 6.3, donde se comparan los tiempos con MySQL, PostgreSQL y Hadoop estándar, así como con una arquitectura basada en Lambda.

Finalmente en la Tabla 6.4, se muestra la mejora porcentual en los tiempos al implementar una arquitectura basada en Lambda en lugar de usar Hadoop estándar.

	MySQL	PostgreSQL	Hadoop Estándar	Hadoop (Arquitectura Lambda)
Todos los datos de mareógrafos	8.12	9.72	60.03	9.01
Un atributo ordenado por fecha	10.55	11.53	74.83	8.91

Tabla 6.3: Comparativa de tiempos entre sistemas incluyendo Hadoop con la arquitectura Lambda

	Mejora (%)
Todos los datos de mareógrafos	85
Un atributo ordenado por fecha	88

Tabla 6.4: Mejora de tiempos (%) usando Hadoop con Lambda en lugar de Hadoop estándar

6.8. Análisis de Datos en SmartPort

En esta sección, desarrollamos algunas de las capacidades de SmartPort como sistema de análisis de datos. Este análisis se basa en la agregación de información meteorológica y marítima a lo largo del tiempo, lo que permite realizar análisis estadísticos e históricos de las series de datos (Pablo Fernández et al., 2016).

6.8.1. Caracterización Histórica de Grandes Conjuntos de Datos

Una de las funcionalidades principales de SmartPort es la capacidad de gestionar grandes volúmenes de datos. Aunque la parte analítica sigue en desarrollo, ya se han llevado a cabo tareas básicas de caracterización sobre los datos almacenados en el sistema SmartPort. Un ejemplo de esto es un conjunto de datos obtenido de dos boyas ubicadas en el puerto. Estas boyas se denominan “Reina Sofía” y “León y Castillo” según su ubicación. La boya “Reina Sofía” se encuentra al final de uno de los muelles más importantes del puerto, expuesta a fuertes oleajes, mientras que “León y Castillo” está protegida por la infraestructura del puerto, como se muestra en la Figura 6.8.

El primer análisis realizado en esta configuración es la visualización del conjunto completo de datos proporcionado por ambas boyas, cuyas ubicaciones se pueden ver en la Figura 6.9. Se ha seleccionado el parámetro denominado “Altura promedio del 10% de las olas más altas”. Es evidente que las lecturas de “León y Castillo” son notablemente más bajas, ya que la infraestructura del puerto atenúa considerablemente el efecto de las olas debido a su ubicación geográfica. Además, se observa una secuencia oscilatoria entre diferentes estaciones del año. Este fenómeno se aborda con más detalle en la sección 6.8.2. Además se pueden observar algunos datos faltantes, debido a fallos temporales en los sensores.

Adicionalmente, se ha realizado un análisis en un conjunto de datos más pequeño, tomando una muestra de solo un día, como se muestra en la Figura 6.10.



Figura 6.8: Ubicación de las boyas "León y Castillo" y "Reina Sofía" en Las Palmas de Gran Canaria (Pablo Fernández et al., 2016).

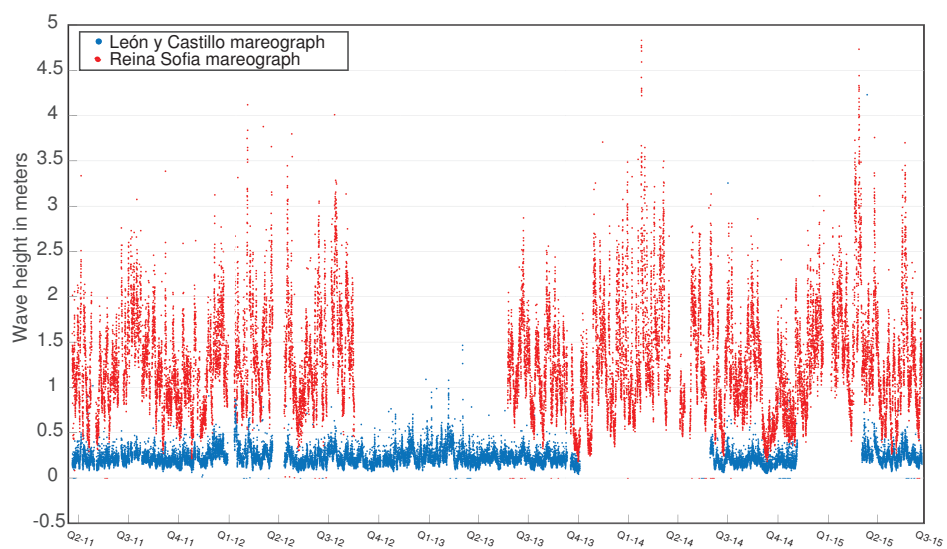


Figura 6.9: Lecturas de 2012 - 2015 de la altura del 10 % de las olas más altas registradas por el mareógrafo Geonica en las boyas "Reina Sofía" y "León y Castillo" (Pablo Fernández et al., 2016).

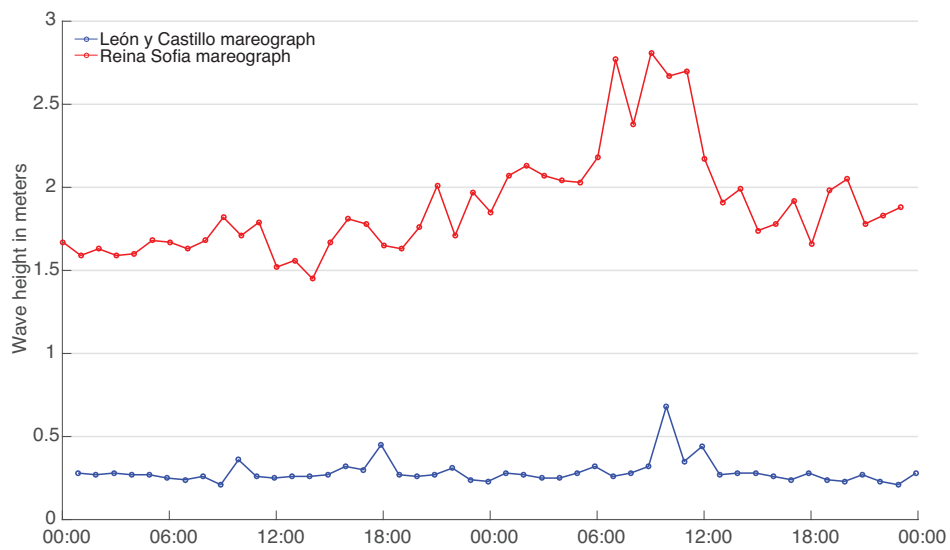


Figura 6.10: Serie de datos del mareógrafo Geonica de ambas boyas, centrada en los días '7/1/2014' - '7/3/2014' (Pablo Fernández et al., 2016).

6.8.2. Análisis Estacional de la Salida de Datos de Sensores Marítimos

Como se explicó en secciones anteriores, SmartPort proporciona herramientas para gestionar grandes conjuntos de datos, relacionados con las condiciones meteorológicas y del mar durante largos períodos de tiempo. Este análisis nos permite realizar estudios históricos, identificar tendencias en los conjuntos de datos e incluso extraer conclusiones sobre los efectos de los diferentes elementos del puerto.

Sin embargo, en algunos casos, un agrupamiento temporal de los conjuntos de datos puede permitirnos obtener una visión más significativa de la información recopilada por los sensores. Para lograr esto, el back-end de SmartPort permite realizar un agrupamiento temporal de los datos según las necesidades del estudio. En este hemos organizado las lecturas de ambos sensores según la estación del año en que fueron tomadas (Pablo Fernández et al., 2016). La selección de los agrupamientos utilizados en este estudio se basa en cómo el estado del mar varía apreciablemente a lo largo de las estaciones.

De hecho, al estudiar la variación estacional de la altura media de las olas durante los años 2011 - 2015, se puede entender que la ola externa aumenta aproximadamente un 25 % del otoño al invierno, mientras que la ola interna lo hace en un 21 % aproximadamente. Este cambio estacional en el estado del mar se puede ver en la Figura 6.11.

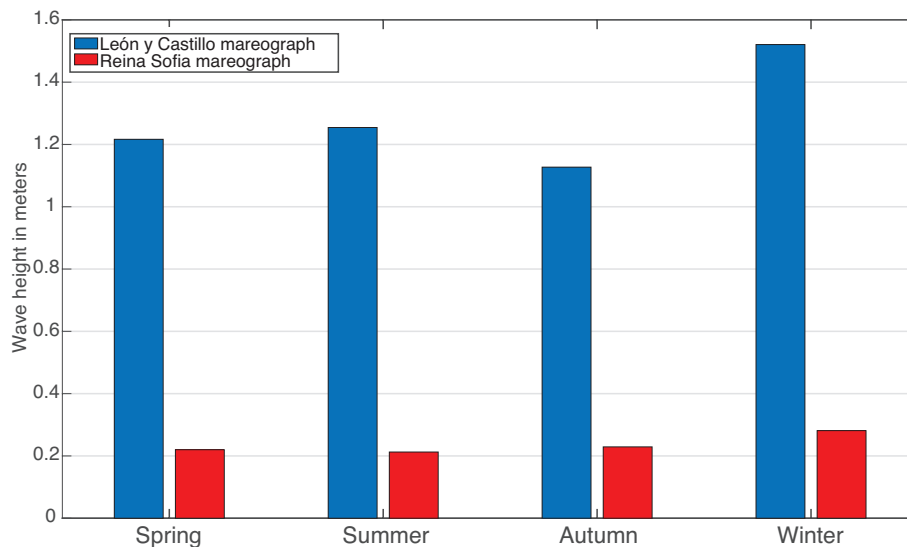


Figura 6.11: Altura promedio del 10 % de las olas más altas registrada por el Mareógrafo Geonica en las boyas “Reina Sofía” y “León y Castillo”, agrupada por temporada para los años 2011 - 2015 (Pablo Fernández et al., 2016).

Una vez establecida la variabilidad de las condiciones del mar a lo largo de las diferentes estaciones del año, podemos extraer información estadística sobre cada temporada del período 2011 - 2015. Basándose en estas estadísticas, la Autoridad Portuaria puede obtener conclusiones significativas sobre la variación estacional del oleaje y el comportamiento de los sensores instalados.

Un dato relevante sobre el rendimiento de los sensores es la presencia de lecturas

consideradas como atípicas dentro de este conjunto de datos. El criterio utilizado para identificar tales lecturas es considerar cualquier punto de datos que se encuentre a más de 1.5 rangos intercuartiles (IQR) por debajo del primer cuartil o por encima del tercer cuartil. Los resultados de dicho análisis se presentan en las Tablas 6.5 y 6.6, que muestran el rendimiento del Mareógrafo Geonica colocado en las boyas de “León Y Castillo” y “Reina Sofía” respectivamente.

Año - Temporada	Mín (m.)	Media (m.)	Máx (m.)	Frecuencia (seg.)	Outliers
11 - Primavera	0.00	0.21	1.07	4258.20	130 (6.85 %)
11 - Verano	0.08	0.22	0.63	4139.82	147 (7.52 %)
11 - Otoño	0.02	0.25	0.90	3771.61	82 (4.25 %)
11 - Invierno	0.00	0.28	1.07	4509.50	159 (9.31 %)
12 - Primavera	0.00	0.21	0.79	3647.96	85 (5.01 %)
12 - Verano	0.00	0.23	0.78	3923.63	78 (3.77 %)
12 - Otoño	0.08	0.24	0.76	3839.16	176 (8.79 %)
12 - Invierno	0.00	0.28	1.47	3616.78	159 (7.40 %)
13 - Primavera	0.09	0.23	1.07	3730.14	131 (6.15 %)
13 - Verano	0.09	0.21	1.34	3860.20	171 (8.13 %)
13 - Otoño	0.05	0.14	0.38	3680.00	20 (7.38 %)
14 - Primavera	0.00	0.17	0.65	5112.46	33 (5.07 %)
14 - Verano	0.06	0.19	3.26	3737.91	117 (5.39 %)
14 - Otoño	0.00	0.20	1.08	3699.35	100 (10.20 %)
14 - Invierno	0.17	0.31	4.23	3615.90	33 (7.93 %)
15 - Primavera	0.00	0.24	2.09	3745.97	146 (6.88 %)

Tabla 6.5: Altura promedio del 10 % de las olas más altas registradas por el Mareógrafo Geonica en la boya “León y Castillo”, agrupada por temporada y año (Pablo Fernández et al., 2016).

Analizando los datos de la Tabla 6.5, que muestra los resultados del mareógrafo localizado en el interior del puerto (“León y Castillo”), una de las primeras conclusiones, es la notable falta de información para el período de invierno de 2013, debido a una desconexión de la boya por mantenimiento durante ese periodo. También es destacable que, aunque la boya ofrece un nuevo dato cada hora (3600 segundos), la frecuencia media de los datos es notablemente mayor (alrededor de 3900 segundos). Esto se debe a valores perdidos durante la transferencia de la señal desde la boya al receptor de datos en el puerto. El número de *outliers* también es aparentemente mayor en temporadas con oleaje más alto, como inviernos y otoños, lo que podría interpretarse como una mayor tasa de mal funcionamiento del sensor durante esos períodos.

De manera similar, la Tabla 6.6 describe los datos del mareógrafo que mide las condiciones marítimas fuera del abrigo del puerto (“Reina Sofía”). El análisis muestra que faltan los períodos de otoño e invierno de 2012, debido igualmente a actividades de mantenimiento. La frecuencia media de los datos entrantes es de 4048 segundos, debido a la mayor distancia que la señal debe recorrer. El número de *outliers* detectados en este caso ha disminuido, lo que indica un conjunto de lecturas más consistente a lo largo de

Año - Temporada	Mín (m.)	Media (m.)	Máx (m.)	Frecuencia (seg.)	Outliers
11 - Primavera	0.00	1.12	3.34	4584.23	72 (2.08 %)
11 - Verano	0.28	1.34	3.39	4106.19	41 (1.96 %)
11 - Otoño	0.22	1.14	3.13	4077.49	37 (5.50 %)
11 - Invierno	0.53	1.37	4.12	4596.37	93 (6.88 %)
12 - Primavera	0.00	1.25	6.33	4635.47	118 (3.19 %)
12 - Verano	-9.00	1.59	6.47	4080.98	39 (2.90 %)
13 - Primavera	0.00	1.27	2.52	3610.99	19 (3.52 %)
13 - Verano	0.00	1.18	2.87	3867.58	74 (1.51 %)
13 - Otoño	0.19	1.11	3.71	3632.33	32 (5.54 %)
13 - Invierno	0.00	1.54	5.28	3725.84	111 (1.12 %)
14 - Primavera	0.00	1.28	3.14	4431.13	17 (2.22 %)
14 - Verano	0.00	1.07	2.86	3674.66	49 (1.90 %)
14 - Otoño	0.36	1.13	3.12	3649.57	40 (9.73 %)
14 - Invierno	-9.00	1.65	4.73	4426.20	171 (7.32 %)
15 - Primavera	0.00	1.20	3.76	3626.52	159 (2.08 %)

Tabla 6.6: *Altura promedio del 10 % de las olas más altas registradas por el Mareógrafo Geonica en la boya "Reina Sofía", agrupada por temporada y año (Pablo Fernández et al., 2016).*

cada una de las estaciones.

Otra herramienta para entender los datos gestionados por SmartPort es la representación gráfica estadística de los datos agrupados. En este caso, la variación de los datos recopilados a lo largo de las estaciones puede entenderse mejor gráficamente. Las Figuras 6.12 y 6.13 es visible cómo la concentración de los datos recogidos varía de acuerdo con el comportamiento esperado del oleaje en cada estación. Una vez más, muestran con precisión la efectividad del dique, reduciendo el efecto de las olas dentro del puerto.

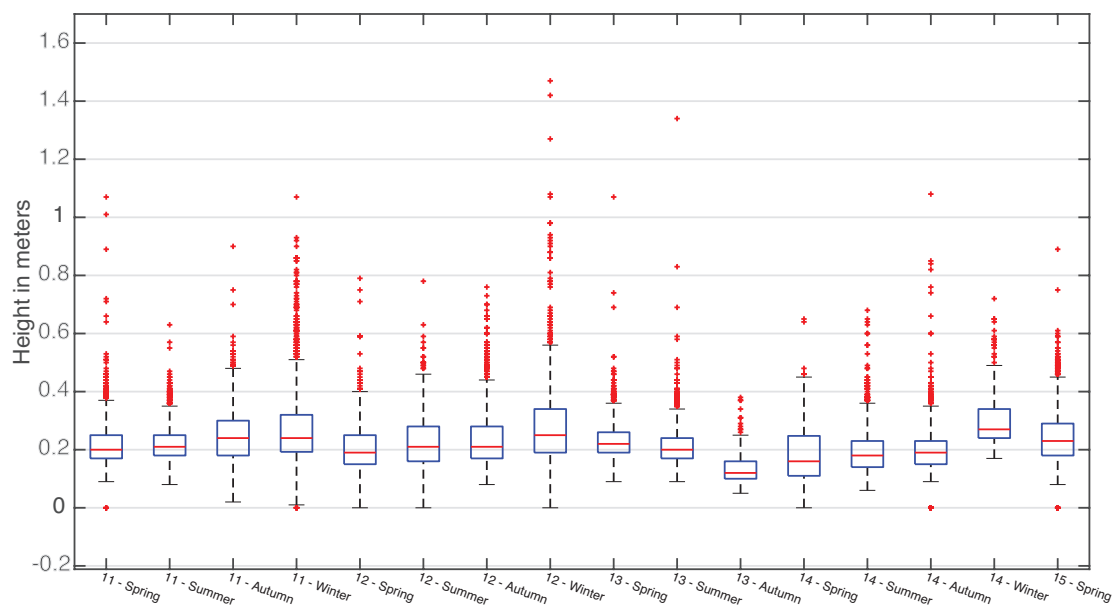


Figura 6.12: Distribución por cuartiles de la serie de datos de altura de las olas registrada por el Mareógrafo Geonica en la boya “León y Castillo”, agrupada por temporada y año (Pablo Fernández et al., 2016).

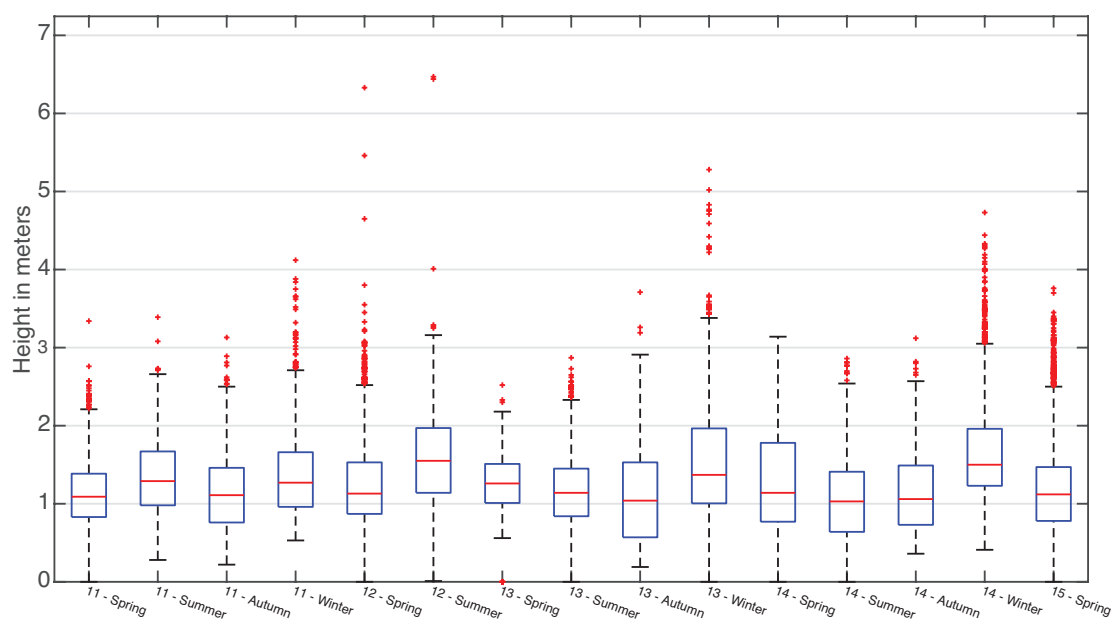


Figura 6.13: Distribución por cuartiles de la serie de datos de altura de las olas registrada por el Mareógrafo Geonica en la boya “Reina Sofía”, agrupada por temporada y año (Pablo Fernández et al., 2016).

6.8.3. Análisis de Datos de Múltiples Sensores en SmartPort

Una de las funcionalidades potenciales de SmartPort es la asistencia en la reubicación y reorientación de barcos basada en las variables de las condiciones del mar. Para ello, SmartPort necesita una función, que denominaremos función de riesgo, la cual calcula un valor de riesgo utilizando como entrada un conjunto de variables tales como la altura de la ola, el período de la ola y la dirección de la corriente. La aplicación de SmartPort debe evaluar este valor en función de la longitud y orientación del barco, y actuar en consecuencia.

Por ejemplo, SmartPort debería notificar que algunos barcos pequeños anclados deben ser reorientados o reubicados si la función de riesgo determina que el riesgo es medio y el ángulo entre la orientación del barco y la dirección de la corriente es mayor de 45 grados (Figura 6.14).

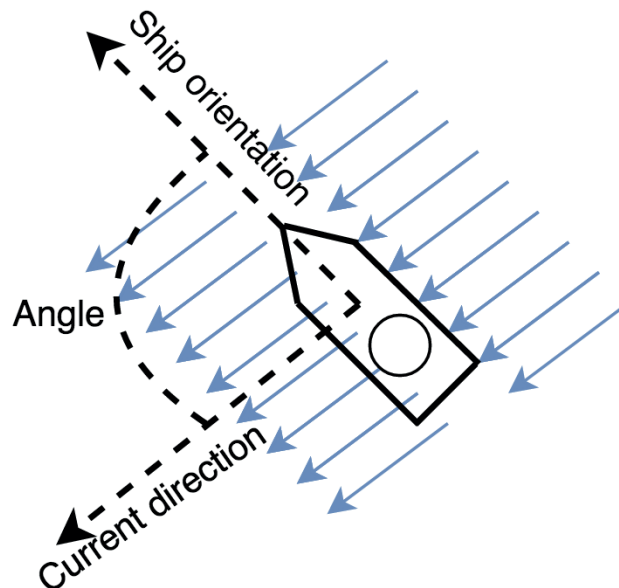


Figura 6.14: Un barco cuyo ángulo entre su orientación y la dirección de la corriente es mayor de 45 grados (Pablo Fernández et al., 2016).

Para crear la función de análisis de riesgo, proponemos utilizar lógica difusa. Con este enfoque, podemos definir fácilmente un sistema basado en reglas sin necesidad de un modelo matemático complejo.

Una de las partes fundamentales de un sistema difuso es la definición del grado de pertenencia (qué tanto un valor pertenece a una categoría) para cada magnitud. En este ejemplo, hemos utilizado funciones trapezoidales para las magnitudes de riesgo y altura de las olas, mientras que se han utilizado funciones de distribución normal para el período de las olas.

La Figura 6.15 ilustra las funciones que representan el grado de pertenencia para

cada categoría basada en la magnitud del riesgo, mostrando 3 categorías distintas: bajo, medio y alto. Por ejemplo, un valor de riesgo se considera bajo para todos los valores inferiores a 4.

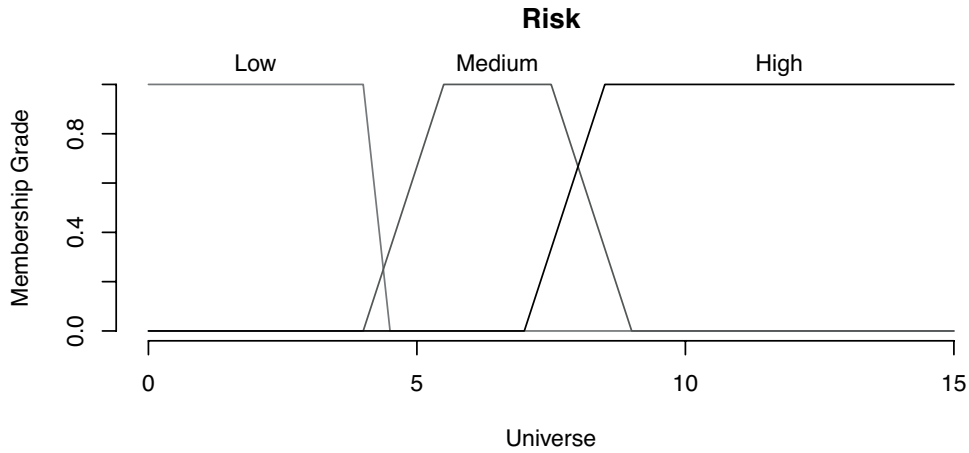


Figura 6.15: Grado de pertenencia para el riesgo (Pablo Fernández et al., 2016).

En la Figura 6.16 podemos ver el grado de pertenencia para las categorías que definen la altura de la ola. En este caso, se distinguen cuatro categorías: bajo, normal, alto y muy alto. La altura de la ola se considera baja para todos los valores menores de 1.3 metros (con un grado de pertenencia completo hasta un valor de 0.6 metros).

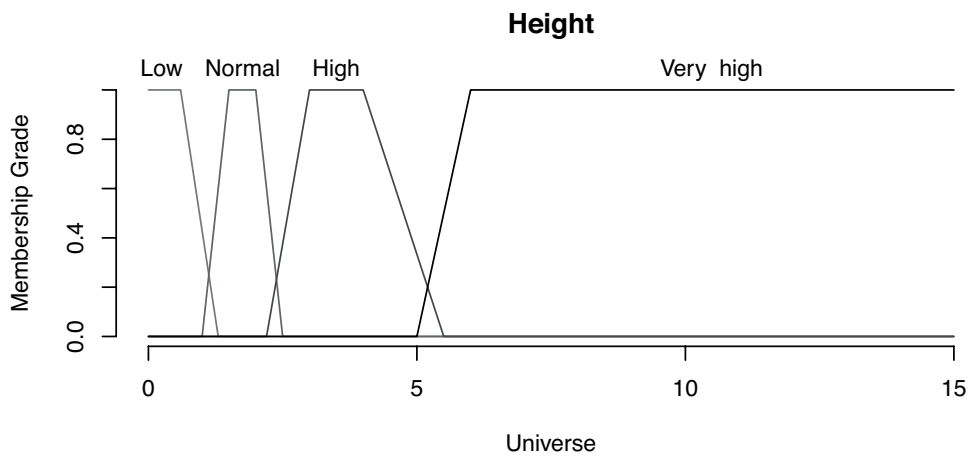


Figura 6.16: Grado de pertenencia para la altura de la ola (Pablo Fernández et al., 2016).

Finalmente, la Figura 6.17 muestra el grado de pertenencia para la magnitud del período de la ola. Se han definido categorías cualitativas baja, normal, alta y muy alta y, como se especificó anteriormente, se utilizan funciones de distribución normal para definir la pertenencia. Por ejemplo, se puede ver que la categoría baja se define con un valor medio de 1 segundo.

La otra parte fundamental de un sistema de lógica difusa es la definición de sus reglas. Utilizando un "lenguaje natural", estas reglas definen el comportamiento del sistema. En el siguiente bloque, se muestra las reglas utilizadas en este ejemplo. Por ejemplo, la primera regla de la figura se interpreta como la regla: cuando la altura de la

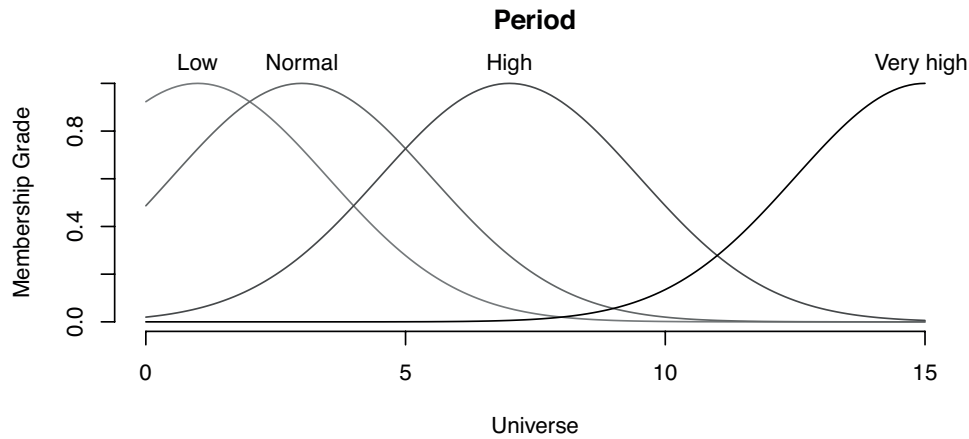


Figura 6.17: Grado de pertenencia para el período de la ola (Pablo Fernández et al., 2016).

ola es baja, el nivel de riesgo es bajo.

```

1 ## Definir reglas
2 rules <-
3 set(
4
5 fuzzy_rule(Height %is% Low, Risk %is% Low),
6 fuzzy_rule(Height %is% Normal, Risk %is% Low),
7 fuzzy_rule(Height %is% High && Period %is% High, Risk %is% Medium),
8 fuzzy_rule(Height %is% High && Period %is% Normal, Risk %is% Medium),
9 fuzzy_rule(Height %is% High && Period %is% Low, Risk %is% High),
10 fuzzy_rule(Height %is% High && Period %is% Very_high, Risk %is%
    Medium),
11 fuzzy_rule(Height %is% Very_high, Risk %is% High)
12
13 )

```

Una vez que el sistema está definido, solo necesitamos realizar una inferencia con los datos leídos de los sensores y luego usar la función de desdifusión para obtener el valor de riesgo como se muestra a continuación:

```

1 ## Combinar en un sistema
2 system <- fuzzy_system(variables, rules)
3
4 ## Realizar inferencia
5 fi <- fuzzy_inference(system, list(Height = 1.5, Period = 8))
6
7 ## Desdifusificar
8 gset_defuzzify(fi, "centroid")

```

Usando este sistema simplificado, si proporcionamos como entrada un valor de altura de ola de 1.5 metros y un período de 8 segundos, la función de desdifusión devuelve un valor de riesgo de 2.1 y no se requieren acciones. Sin embargo, si proporcionamos una altura de ola con un valor de 4 metros, la función de desdifusión devuelve un valor de

riesgo de aproximadamente 6.7. En ese caso, todos los barcos pequeños que no estén alineados con la corriente deben ser reorientados.

Este estudio de caso muestra el potencial de combinar diferentes datos de sensores para mejorar las capacidades de SmartPort como un sistema de soporte a la toma de decisiones. Además, una de las ventajas del uso de lógica difusa es su cercanía al lenguaje natural, lo que facilita la participación de los técnicos del puerto en la extensión de esta herramienta para cubrir más aspectos de la toma de decisiones en el monitoreo y gestión diaria.

6.9. Administrador de Alertas para Datos de Sensores en Smart-Port

Las alertas son un objetivo estratégico fundamental en SmartPort, ya que permiten la gestión proactiva y eficiente de las operaciones en el puerto marítimo. La visualización de datos, aunque crucial, no es el único aspecto relevante de esta plataforma; por eso se han integrado funciones de Sistemas de Soporte a la Decisión en SmartPort.

Estas funciones avanzadas son esenciales para proporcionar un entorno de trabajo inteligente y reactivo que facilite la toma de decisiones informadas y oportunas en el puerto.

Implementar un sistema de alertas se considera crucial porque permite a los administradores y operadores del puerto recibir notificaciones inmediatas cuando un sensor detecta un valor específico. Este mecanismo de alerta mejora significativamente el control y la supervisión del sistema de sensores del puerto, asegurando que se tomen medidas rápidas y adecuadas ante cualquier anomalía o evento significativo.

El flujo de trabajo del sistema de alertas comienza con la creación de una alerta. Esta alerta se define en base a:

1. El sensor y su tipo.
2. El atributo que se va a monitorizar .
3. La condición específica que debe cumplirse para que la alerta se active.

Actualmente, las alertas se pueden configurar para que se activen cuando el valor del sensor esté por debajo, iguale o supere el valor especificado en la condición de la alerta. Esta flexibilidad permite a los usuarios adaptar las alertas a diferentes situaciones y necesidades operativas. El proceso de gestión de alertas es el siguiente

1. Una vez que se crea una alerta, el sistema genera una suscripción a Orion, utilizando una API personalizada de Python en el backend.
2. Orion facilita la gestión y el procesamiento de datos en tiempo real, y su integración con SmartPort permite una monitorización continua y precisa de los sensores. Cada vez que se cumple la condición definida para una alerta, Orion envía una notificación al sistema.

3. Cuando se recibe una notificación que activa una alerta desde Orion, esta información se almacena en una base de datos MySQL. Esta base de datos centralizada asegura que todas las alertas se registren y puedan ser consultadas en cualquier momento.
4. Posteriormente, la aplicación web de SmartPort recupera la nueva alerta a través de una API personalizada, respaldada por un módulo de servidor PHP. Esta API facilita la comunicación entre el backend y el frontend, asegurando que la información de las alertas se transmita de manera eficiente y se muestre en la interfaz de usuario.
5. Finalmente, existe un servicio que recibe las notificaciones de suscripciones de Cosmos. El front-end muestra una relación de las alertas actuales y brindan la posibilidad de activarlas o desactivarlas, como se muestra en la Figura 6.18.

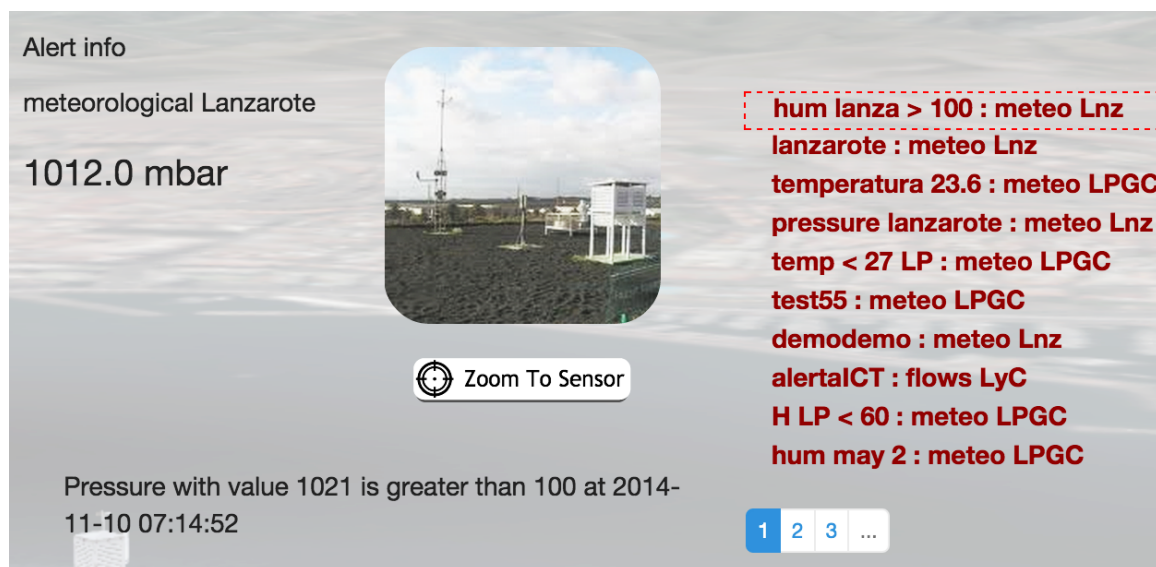


Figura 6.18: Centro de notificaciones y alertas mostrado cuando los datos alcanzan un margen definido. (Pablo Fernández et al., 2017).

En el front-end de la aplicación, se presentan de manera clara y organizada las alertas actualmente activas, así como las alertas que fueron activadas pero ya no están en vigor. Esta funcionalidad permite a los usuarios tener una visión completa del estado de los sensores y las condiciones del puerto en tiempo real, además de proporcionar un historial de alertas que puede ser útil para análisis posteriores y toma de decisiones. Esto se hace posible mediante el gestor de alertas, como se puede ver en la Figura 6.19.

Además, debido al gran volumen de datos a considerar, un sistema de alertas es una funcionalidad deseable. Este sistema debe informar al usuario cuando ciertos valores han alcanzado umbrales específicos. Por ejemplo, el sistema de gestión de emergencias podría utilizar estas alertas para tomar decisiones rápidas basadas en datos confiables y actualizados.

La API Pub/Sub de Orion cubre todas las funcionalidades que este sistema requiere. Se crea una suscripción para cada sensor que se debe monitorear. Así, cada vez que se

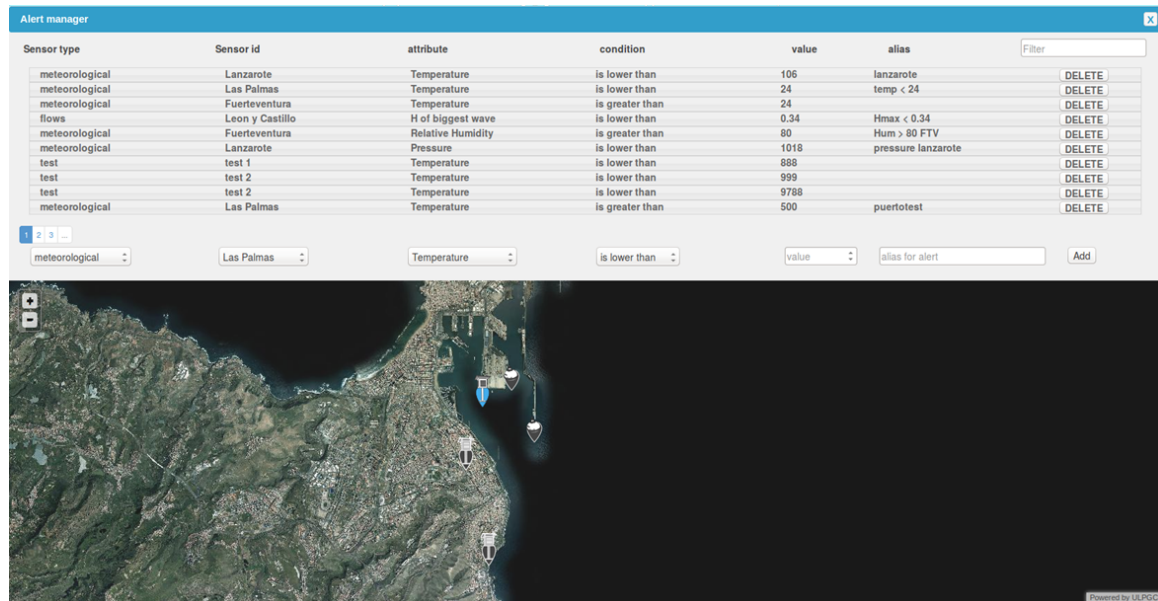


Figura 6.19: Centro de de gestión de alertas. (Pablo Fernández et al., 2017).

genera una alerta, se verifica si ya existe una suscripción al atributo del sensor y, de ser necesario, se crea. Por otro lado, cada alerta con sus condiciones de activación se almacena en una base de datos.

6.10. Visualización de Datos de Sensores a Través de la Aplicación de Internet Enriquecida SmartPort

El frontend de SmartPort es un RIA que resume los datos del puerto marítimo de forma comprensible para el usuario. Se basa en un globo virtual 3D que modela el puerto marítimo de Las Palmas utilizando el framework Glob3 Mobile (3GM, 2024).

6.10.1. Visualización 3D del Terreno e Instalaciones en SmartPort

Durante los últimos años, hemos colaborado activamente con la empresa IGO Software en la creación de Glob 3 Mobile, un motor de renderizado 3D que permite crear aplicaciones de globos virtuales (3GM, 2024). G3M ofrece las herramientas web necesarias para la visualización de mapas 3D y está orientado a la visualización georreferenciada de datos, lo que permite al usuario explorar virtualmente el puerto marítimo y localizar visualmente las estaciones de sensores. Como el motor G3M ofrece todos los requisitos funcionales del front-end SmartPort, fue elegido como el elemento principal de nuestra aplicación de Internet.

G3M está disponible como una biblioteca JavaScript que puede ser utilizada por la aplicación web, mediante de una API JS, el desarrollador establece los principales parámetros del globo virtual (imágenes, extensión, modelo de elevación, etc.) y la posición de la cámara virtual. Este escenario virtual se integra en el documento web

como un widget que, en el caso de SmartPort, se coloca como fondo de la web ocupando todo el espacio de la pantalla, como se muestra en la Figura 6.20.

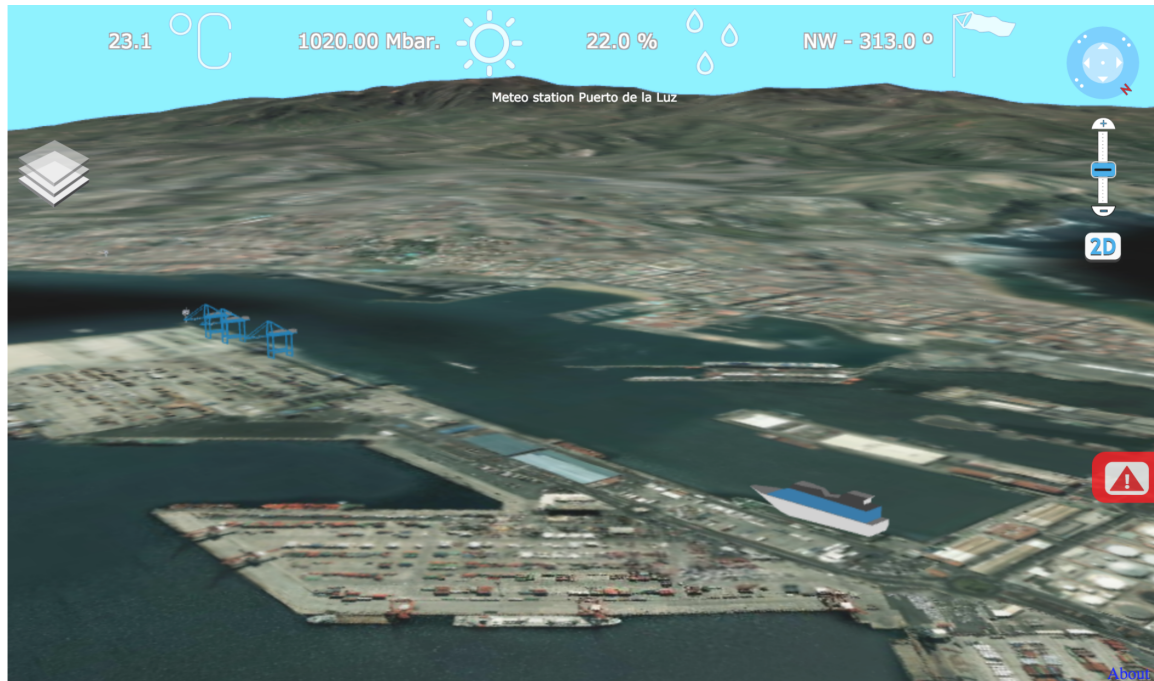


Figura 6.20: Vista general del puerto generado con 3GM.

El escenario 3D del puerto marítimo es el elemento principal de la interfaz web de SmartPort, proporcionando una representación significativa de todos los elementos geolocalizados rastreados por el sistema. G3M permite la inclusión de objetos 3D dentro del escenario virtual de la Tierra, mostrando la ubicación precisa de elementos importantes.

Esta visualización SIG entra en la categoría de motores virtuales de la Tierra para la web, lo que constituye un problema abierto en sí mismo en el campo de los gráficos por ordenador. Se pueden encontrar muchos motores de mapas que se ocupan de este tipo de escenarios 3D, como CesiumJS y WorldWind. Un motor SIG 3D cubre el estado del escenario 3D, para que el resto de la interfaz pueda actualizarse correctamente.

Este widget también puede solicitar información de los servidores de Internet. Esta capacidad permite que el widget acceda no solo al gran conjunto de datos que compone el modelo de terreno, sino también para solicitar información desde el back-end de SmartPort. Toda la arquitectura del RIA se puede ver en la Figura 6.21.

Desde un punto de vista funcional, el motor G3M debe proporcionar ciertas características para apoyar los requisitos operativos de la interfaz de usuario de SmartPort. Una característica clave es mostrar diferentes capas de imágenes sobre el terreno según el interés particular del usuario. Hay muchas formas de obtener las imágenes georreferenciadas. En nuestro caso, se decidió utilizar el protocolo Web Map Service (WMS) desarrollado por la comunidad del Open Geospatial Consortium. Usando este protocolo basado en HTTP, es posible obtener imágenes para cubrir nuestra representación de la superficie del globo. Estas imágenes pueden ser sintéticas, como mapas de calles, mapas

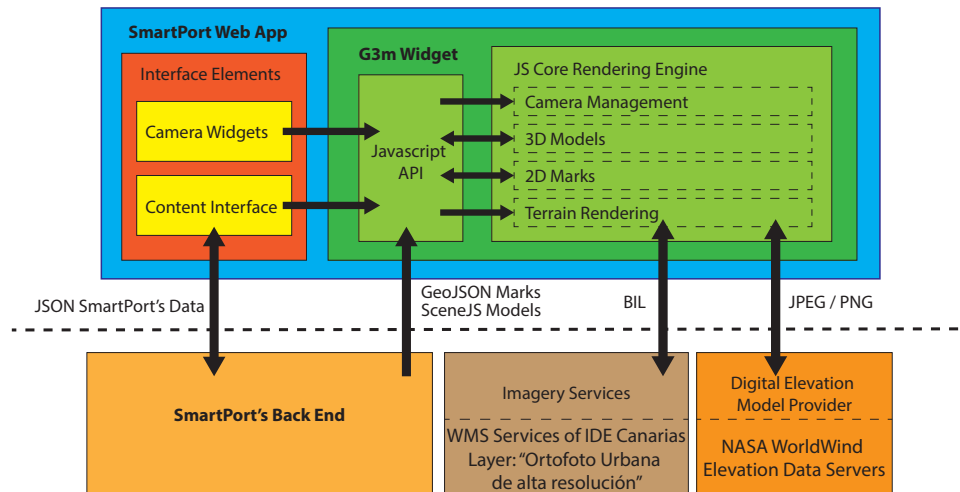


Figura 6.21: Esquema de integración de G3M con el front-end SmartPort y mostrando el acceso a servicios en línea. (Pablo Fernández et al., 2016).

políticos, visualización LiDAR o fotografías aéreas como imágenes satelitales.

En nuestro caso, el visor de SmartPort utiliza como fuente de imágenes general el proyecto Virtual Earth. Este conjunto de imágenes es proporcionado por Microsoft y cubre todo el planeta con fotografías aéreas de alta resolución. Sin embargo, una aplicación destinada a representar los elementos presentes en un entorno portuario requiere una resolución de imagen aún mayor.

El entorno del puerto de Gran Canaria se dibujará utilizando imágenes obtenidas de un servicio IDE WMS local. En este caso, SmartPort utiliza imágenes de GrafCan, una empresa pública responsable del mantenimiento de los datos geográficos de las Islas Canarias. Estas dos capas formarán el conjunto de imágenes base predeterminado que define la apariencia del terreno en el visor.

Además de estas capas base, el sistema G3M permite fusionar estas imágenes base con otras capas semitransparentes para enriquecer el contenido informativo. Un servidor IDE WMS puede proporcionar estas imágenes adicionales también. En este caso, el proyecto SmartPort permite al usuario fusionar información de mapas batimétricos, como se muestra en la Figura 6.22. Estos mapas facilitan al usuario final tomar decisiones bien informadas sobre rutas o calado máximo de los barcos.

La interfaz web de SmartPort muestra una porción de la superficie terrestre que cubre totalmente no sólo el entorno del puerto marítimo, sino gran parte del mar y toda la isla de Gran Canaria. El modelo de esta superficie representa una gran cantidad de información, que incluye la geolocalización de los puntos de la malla, su altitud y las imágenes que se muestran sobre ellos. Para gestionar toda esta información, la superficie terrestre se va a representar mediante un modelo multiresolución que evoluciona en función de la posición de la cámara y la altitud, según un algoritmo llamado nivel jerárquico de detalle.

El widget de JavaScript define una API a la que se puede acceder desde otros módulos del documento web. Por ejemplo, la información de la vista 3D, como la posición de la

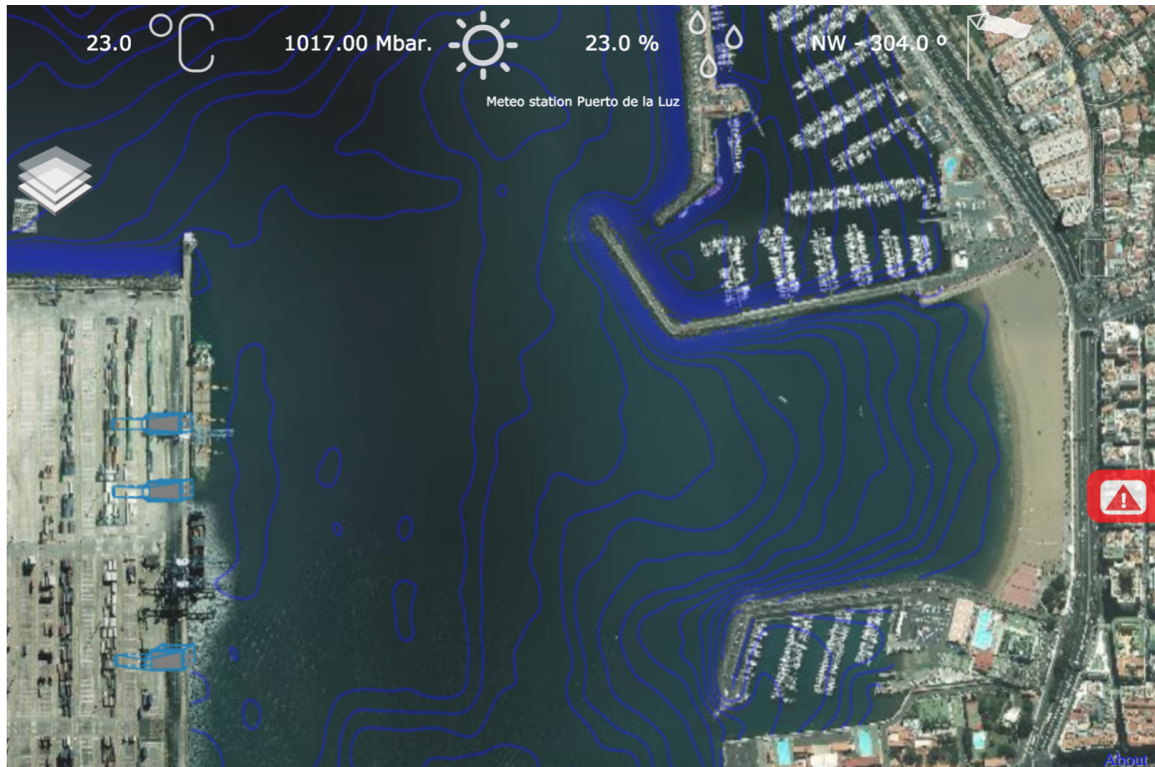


Figura 6.22: Batimetría combinada con la capa de ortofoto, ambas obtenidas mediante el protocolo Web Map Service (WMS). (Pablo Fernández et al., 2016).

cámara, se puede modificar mediante acciones en otros elementos de la web. Además, esta rejilla de superficie se desplaza verticalmente siguiendo un Modelo Digital de Elevación (MDE) que representa la altitud de las zonas aledañas al puerto marítimo.

G3M también permite la inclusión de objetos 3D que se van a renderizar dentro del escenario virtual de la Tierra. Estos objetos se importan en formato SceneJS y pueden incluir texturas y hacer uso de un sistema de iluminación global.

SmartPort utiliza esta función para mostrar con precisión la ubicación de elementos importantes, como fuentes de datos estáticas (boyas y sensores meteorológicos) y otros elementos móviles. En la Figura 6.23 se pueden ver modelos de dichos buques y grúas.

Una de las utilidades integradas en SmartPort es una opción para resaltar la ubicación de diversos servicios relacionados con las actividades portuarias. Estos elementos componen un conjunto que puede llegar a varios cientos de ubicaciones.

Para mostrar la ubicación de tantos elementos, no se pueden utilizar modelos 3D detallados, ya que provocan tiempos de renderizado prolongados y se escalan según la perspectiva del usuario. En su lugar, utilizamos la siguiente solución de renderizado: para cada elemento, el motor de renderizado muestra un panel que se proyecta en la posición 3D de esa ubicación. El panel muestra una pequeña imagen y, adicionalmente, algo de texto.

Los paneles son ejes alineados dentro del espacio de la pantalla y no se reducen mediante la proyección en perspectiva, como se puede ver en la Figura 6.24.

Como puede haber muchos elementos proyectados en posiciones cercanas de la

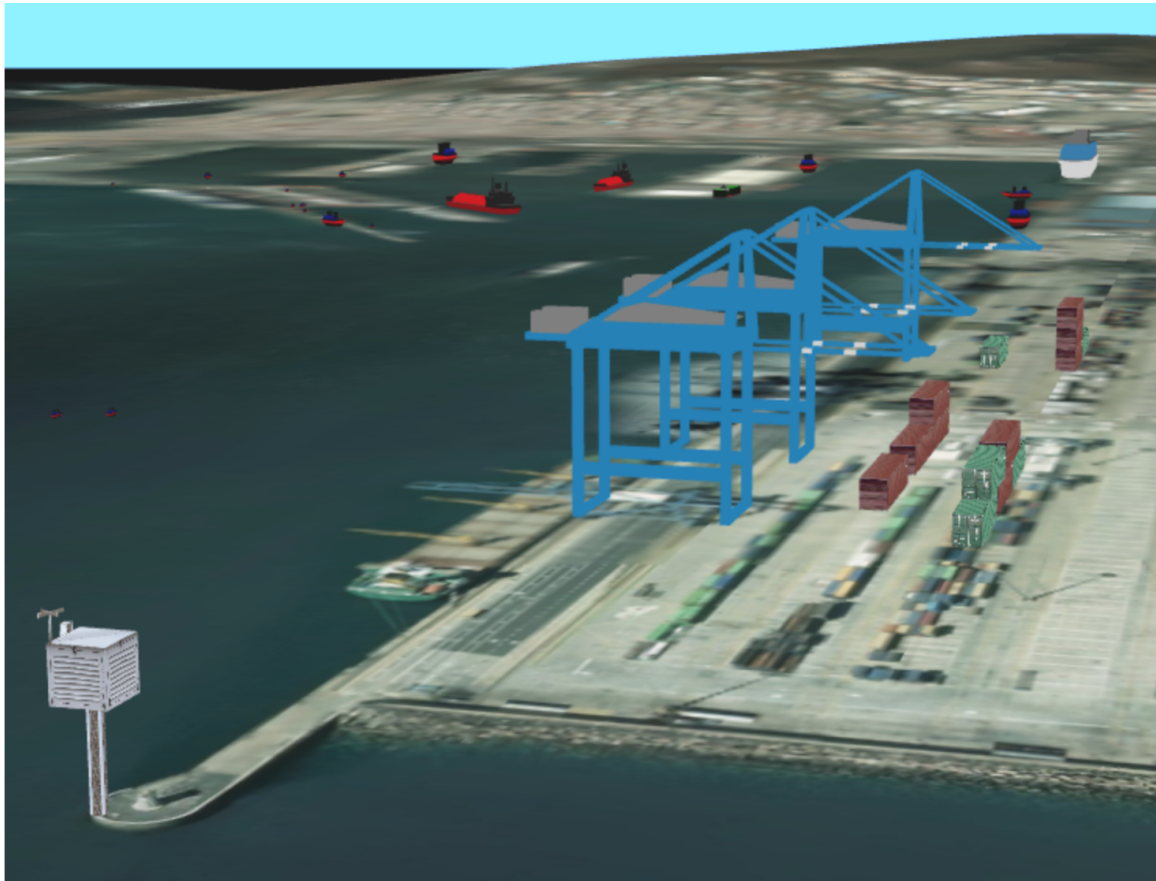


Figura 6.23: Modelos 3D que muestran la posición actual de los buques, contenedores y grúas dentro del entorno portuario. (Pablo Fernández et al., 2018).

pantalla, las marcas podrían aparecer unas encima de otras, haciéndolas ilegibles. Para ello se han desarrollado métodos de agrupamiento sobre la marcha y nuevos tipos de marcas móviles.

SmartPort está diseñada principalmente para usarse para el modo de escritorio, ya que las aplicaciones web normalmente se ejecutan en computadoras personales. Sin embargo, a algunos usuarios les resulta más comprensible manejar los controles en pantalla, ya que ofrecen una representación visual de la posición y altitud de la cámara. Este tipo de controles se utilizan ampliamente en otras aplicaciones SIG. Por este motivo, SmartPort tiene controles visuales integrados en la esquina superior derecha de la pantalla.

Estos controles se conocen como hud, que representa el rumbo de la cámara y su inclinación, y un desplazamiento constante que permite cambiar la distancia de la cámara al suelo. Los controles y su uso se pueden ver en la Figura 6.25. Estos controles son similares a otros controles que se encuentran en conocidas aplicaciones de globos virtuales, como Google Earth, facilitando la adaptación del usuario al sistema.



Figura 6.24: Paneles en 2D que muestran la posición de diferentes elementos en los alrededores del puerto. (Pablo Fernández et al., 2018).

6.10.2. Modelos Tridimensionales en SmartPort

SmartPort también utiliza modelos 3D para representar activos importantes dentro del área del puerto. Estas entidades son las boyas y los sensores marítimos. Los usuarios pueden reconocer fácilmente estos elementos por su posición y forma. En el ejemplo de Gran Canaria, se han ubicado cinco boyas en las cercanías del puerto. Cada una de ellas está representada por su propio modelo 3D. El motor G3M permite al desarrollador usar modelos coloreados, como el modelo mostrado en la Figura 6.26, o modelos texturizados y renderizarlos utilizando efectos de luz y sombreado, como se ve en la Figura 6.27.

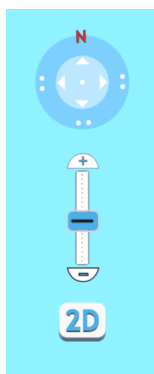


Figura 6.25: Los widgets Head Up Display (HUD) en pantalla brindan control sobre la altitud de la cámara virtual. (Pablo Fernández et al., 2016)

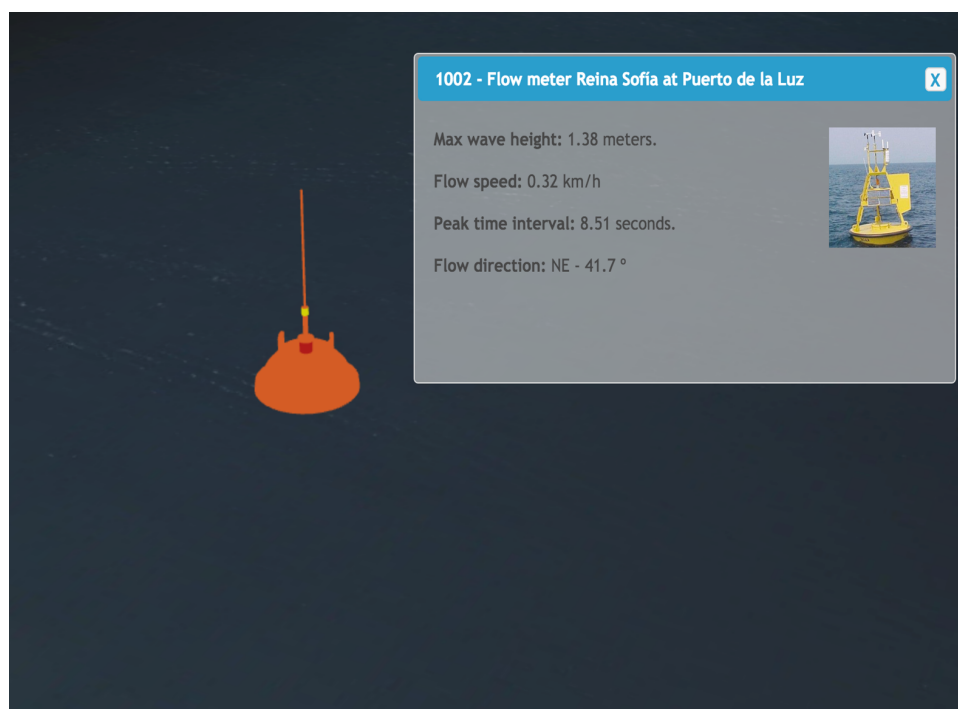


Figura 6.26: Imagen de un modelo que representa una boya. (Pablo Fernández et al., 2018).



Figura 6.27: Imagen de un modelo que representa una estación meteorológica. (Pablo Fernández et al., 2018).

Como ocurre con los marcadores, es de gran interés que todos los objetos 3D de la escena sean seleccionables para poder realizar acciones y mostrar información a medida que el usuario interactúa con ellos. En el caso de SmartPort para web, esta interacción podría ser mediante el uso del dispositivo de ratón o pantallas multitáctiles. La implementación de este criterio de selección se basa en jerarquías de cuadros delimitadores que permiten calcular eficientemente el problema de la intersección. Una vez seleccionado el objeto, se envía un mensaje al resto del sistema. De esta manera, se puede realizar una cierta acción, como mostrar datos recopilados por el sensor seleccionado.

6.10.3. Aplicación Nativa para Dispositivos Móviles

La aplicación SmartPort fue concebida inicialmente para ejecutarse en una computadora mediante un navegador HTML. Sin embargo, es conveniente utilizar SmartPort en un dispositivo móvil, como una tableta. Por ejemplo, un operador puede navegar hasta el puerto y ver o editar cualquiera de los parámetros georreferenciados relacionados con la aplicación, como boyas, sensores, etc.

Otro caso de uso ocurre cuando se genera una alerta relacionada con un sensor específico. En este caso, el usuario ve su ubicación precisa en el mapa. Como la mayoría de las tabletas incluyen sensores GPS, que informan la ubicación del usuario, un operador puede encontrar rápidamente el sensor problemático.

Actualmente, se puede acceder al RIA de SmartPort desde navegadores móviles, como se puede ver en la Figura 6.28. Sin embargo, las versiones móviles de los navegadores, incluidas en teléfonos inteligentes y tabletas, no son del todo eficientes a la hora de manejar escenas 3D complejas. Además, la interacción de gestos dentro del lienzo del navegador no funciona correctamente cuando se utilizan varios dedos para manejar la escena.



Figura 6.28: Versión nativa de SmartPort ejecutándose en una tableta. (Pablo Fernández et al., 2016).

La principal interfaz de usuario del proyecto SmartPort se ha definido como un RIA basado en una visualización 3D del entorno portuario. Este entorno 3D se enriquece con la inclusión de datos georreferenciados proporcionados por el back-end de SmartPort.

G3M ofrece una amplia gama de interacciones impulsadas por el usuario que le permiten mover la cámara a través del escenario virtual. Cada una de estas entradas de usuario pertenece a uno de los siguientes grupos:

1. Modo escritorio: paradigma clásico de interacción con el ratón y el teclado. El usuario puede mover la cámara virtual arrastrando el escenario o combinando el movimiento del ratón con comandos del teclado que alteran el tono y el rumbo de la cámara. La rueda del ratón permite controlar un efecto rápido de acercamiento y alejamiento de la cámara. Además, las teclas de flecha permiten al usuario desplazar la cámara en el espacio geográfico.
 2. Modo multi-táctil: en dispositivos móviles, la interacción del usuario se realiza tocando la pantalla del dispositivo. G3M reconoce varios dedos que se mueven en la pantalla y los interpreta como comandos de movimiento de la cámara. Estos gestos multi-táctiles incluyen doble toque (acercar), arrastre simple (escenario de arrastre), doble arrastre (efecto de zoom y rotación) y triple arrastre (control de tono y rumbo de la cámara).
- contenidos...

SISTEMA DE GESTIÓN INTELIGENTE DE AGUAS

Las empresas de suministro de agua urbana desempeñan un papel crucial en la sociedad moderna, proporcionando un recurso vital para la vida humana y el desarrollo socioeconómico. La importancia de estas empresas radica no solo en su función de distribuir agua potable de manera segura y eficiente, sino también en su capacidad para gestionar los recursos hídricos de manera sostenible, asegurando su disponibilidad para futuras generaciones. La creciente urbanización y el cambio climático han puesto de manifiesto la necesidad de una gestión del agua más avanzada y resiliente, donde la tecnología juega un papel fundamental.

La base tecnológica de las empresas de suministro de agua urbana ha evolucionado significativamente en las últimas décadas, permitiendo mejoras en la calidad del servicio, la eficiencia operativa y la sostenibilidad ambiental. Uno de los avances más importantes ha sido la implementación de los SIG. Los SIG son herramientas poderosas que permiten la recopilación, análisis y visualización de datos geoespaciales, facilitando la toma de decisiones informadas y estratégicas.

Este capítulo presenta una Arquitectura basada en SIG para la Gestión Inteligente del Agua, descrita en (P. Fernández et al., 2016a) y (Fernández Moniz et al., 2020).

7.1. Casos de Estudio de Aplicaciones para la Gestión del Ciclo Integral del Agua

La gestión eficiente del ciclo integral del agua es crucial para el desarrollo sostenible de las ciudades. La implementación de tecnologías inteligentes en la gestión del agua ha permitido optimizar el uso de este recurso vital, mejorar la calidad del suministro, reducir pérdidas y garantizar un servicio continuo y seguro. En este capítulo, exploraremos diversas soluciones inteligentes aplicadas a la gestión del ciclo integral del agua en diferentes contextos urbanos, ilustrando sus beneficios y desafíos.

1. Soluciones Inteligentes para la Captación y Almacenamiento de Agua
 - Redes de Sensores en Fuentes de Agua: Una de las aplicaciones más significativas de la tecnología inteligente en la gestión del agua es el uso de redes de

sensores para monitorear las fuentes de agua. Estos sensores, colocados en embalses, ríos y lagos, pueden medir parámetros como la calidad del agua, el nivel de almacenamiento y las condiciones ambientales.

- Ejemplo: Proyecto de Monitoreo en el Río Sena, Francia: En Francia, el río Sena ha sido equipado con una red de sensores que monitoriza la calidad del agua en tiempo real. Esta red permite detectar contaminantes y cambios en la calidad del agua, alertando a las autoridades para que tomen medidas inmediatas. Según (Gómez, 2018), esta iniciativa ha mejorado significativamente la capacidad de respuesta ante episodios de contaminación, protegiendo tanto la salud pública como el ecosistema acuático.

2. Gestión Inteligente de la Distribución de Agua

- Sistemas de Distribución Basados en IoT: La integración de tecnologías de Internet de las Cosas en los sistemas de distribución de agua ha revolucionado la manera en que se gestiona el suministro de agua en las ciudades. Los sensores IoT pueden detectar fugas, monitorear la presión y la calidad del agua, y optimizar las redes de distribución para asegurar un suministro eficiente.
- Ejemplo: Sistema de Distribución de Agua en Barcelona, España: Barcelona ha implementado un sistema de distribución de agua basado en IoT que utiliza sensores para monitorear en tiempo real la red de suministro. Este sistema puede detectar y localizar fugas rápidamente, lo que permite a las autoridades reparar las tuberías con mayor eficiencia. (Martínez, 2019) destacan que este sistema ha reducido las pérdidas de agua en un 20 %, mejorando la sostenibilidad y la eficiencia del servicio.

3. Soluciones Inteligentes para el Tratamiento de Agua

- Plantas de Tratamiento Automatizadas: Las plantas de tratamiento de agua están adoptando tecnologías inteligentes para automatizar y optimizar sus procesos. Estas plantas utilizan sensores avanzados y sistemas de control para monitorear y ajustar los procesos de tratamiento en tiempo real, garantizando una mayor eficiencia y calidad en el agua tratada.
- Ejemplo: Planta de Tratamiento de Agua en Singapur: Singapur ha desarrollado plantas de tratamiento de agua altamente automatizadas que utilizan sensores y sistemas de control avanzados. Estas plantas pueden ajustar automáticamente los procesos de tratamiento en función de la calidad del agua entrante, lo que mejora la eficiencia y reduce el consumo de energía. Según (W. Lim, 2020), estas plantas han logrado una eficiencia operativa un 15 % superior en comparación con las plantas tradicionales.

4. Gestión Inteligente del Consumo de Agua

- Medidores de Agua Inteligentes: Los medidores de agua inteligentes permiten a los consumidores y a las autoridades monitorear el consumo de agua en

tiempo real. Estos dispositivos proporcionan datos precisos sobre el uso del agua, lo que facilita la detección de fugas y el desarrollo de estrategias de ahorro.

- Ejemplo: Programa de Medición Inteligente en Tokio, Japón: Tokio ha implementado un programa de medición inteligente que permite a los residentes monitorear su consumo de agua a través de aplicaciones móviles. Este sistema no solo ayuda a los usuarios a gestionar mejor su consumo, sino que también proporciona datos valiosos a las autoridades para mejorar la planificación y gestión de los recursos hídricos. (Yoshida, 2017) señalan que este programa ha resultado en una reducción del consumo de agua doméstica en un 10 %.

5. Gestión Inteligente de Aguas Residuales

- Sistemas de Supervisión y Control: La gestión de aguas residuales se beneficia enormemente de la implementación de tecnologías inteligentes. Los sistemas de supervisión y control permiten monitorear el estado de las redes de alcantarillado y las plantas de tratamiento de aguas residuales, detectando problemas y optimizando los procesos de tratamiento.
- Ejemplo: Gestión de Aguas Residuales en Estocolmo, Suecia: Estocolmo ha implementado un sistema de supervisión y control para la gestión de sus aguas residuales que utiliza sensores para monitorear las redes de alcantarillado y las plantas de tratamiento. Este sistema permite detectar bloqueos y otros problemas en tiempo real, optimizando las operaciones y reduciendo los costos de mantenimiento. Según (Andersson, 2018), este sistema ha mejorado significativamente la eficiencia de la gestión de aguas residuales en la ciudad.

7.2. Presentando el *Geographic Information System for Water Management*

Como hemos comentado anteriormente, en el contexto del suministro de agua, los SIG ofrecen una amplia gama de aplicaciones. Permiten a las empresas mapear y monitorear sus infraestructuras, incluyendo tuberías, bombas y plantas de tratamiento, con gran precisión. Esto no solo mejora la gestión del mantenimiento y la reparación de estas infraestructuras, sino que también ayuda a identificar áreas problemáticas y planificar expansiones de manera más eficiente. Además, los SIG pueden integrar datos de sensores y dispositivos IoT, proporcionando una visión en tiempo real del estado de la red de suministro de agua, lo cual es crucial para la detección y respuesta rápida a fugas o fallos.

La utilización de un SIG también facilita la gestión de los recursos hídricos en un contexto más amplio. Por ejemplo, las empresas pueden utilizar estos sistemas para analizar patrones de uso del agua, modelar escenarios de demanda futura y evaluar el impacto de diferentes estrategias de gestión. Esto es particularmente importante en áreas urbanas, donde la demanda de agua puede variar significativamente y donde

la planificación debe tener en cuenta factores como el crecimiento demográfico, el desarrollo industrial y las variaciones climáticas.

Además de los SIG, otras tecnologías emergentes están transformando el sector del suministro de agua urbana. La implementación de tecnologías de smart metering (medición inteligente) proporciona datos detallados sobre el consumo de agua a nivel de usuario, mejorando la precisión de la facturación y promoviendo prácticas de uso más responsables entre los consumidores.

La digitalización y la automatización de los procesos operativos también han mejorado la eficiencia y la fiabilidad de las operaciones diarias. Las plantas de tratamiento de agua utilizan sistemas de control automatizados para optimizar los procesos de purificación y asegurar que el agua cumple con los estándares de calidad necesarios. Estos sistemas pueden ajustar automáticamente los parámetros de tratamiento en respuesta a cambios en la calidad del agua de entrada, reduciendo así el uso de productos químicos y la generación de residuos.

Los sistemas de gestión del agua tienen un impacto cada vez mayor en el desarrollo de servicios urbanos sostenibles. En este capítulo se presenta el desarrollo de un sistema de información geográfica aplicado a la gestión del agua, *Geographic Information System for Water Management* (GIS-WM) tras haber tenido en cuenta las prioridades de las ciudades inteligentes. Este sistema se ha desarrollado íntegramente con software libre y de código abierto o *Free and Open Source Software* (FOSS) para crear un sistema principal basado en un modelo de datos propuesto eficiente y específico, junto con cuatro herramientas inteligentes que se han desarrollado para la ciudad de Las Palmas de Gran Canaria:

1. Validaciones de red de agua.
2. Simulación de trazas.
3. Datos históricos de navegación.
4. Cortes de suministro inteligentes.

Gracias al sistema introducido, la empresa gestora del agua podrá adaptar su política para ofrecer una mejor experiencia al cliente y planes de consumo basados en herramientas predictivas. En este artículo se destacan y analizan las ventajas para los directivos de las empresas de gestión del agua.

Convertir el software en una mejora valiosa para nuestro planeta y aportar un claro beneficio a nuestra vida cotidiana es un reto que la informática debe afrontar en un marco de desarrollo sostenible. Para abordar ese desafío, existen procesos claramente exigidos, como el desarrollo de cuestiones complejas de diseño y modelado (cómo interactúan los humanos con herramientas, procesamiento de datos y operaciones) y la construcción de relaciones espaciales coherentes de los objetos representados (minería de datos e inteligencia). Finalmente, la elevación de todas estas diferentes abstracciones al nivel humano impacta claramente en la sostenibilidad del planeta (Sarp et al., 2014), el crecimiento económico y el cambio climático.

Las empresas de gestión del agua requieren diferentes tipos de ecosistemas de software para gestionar una gran variedad de información, especialmente grandes

conjuntos de datos de elementos espaciales interconectados: válvulas, hidrantes, tuberías, etc. Todos estos elementos suelen almacenarse mediante bases de datos espaciales que utilizan los técnicos para sus tareas de gestión, planificación y seguimiento. Todos los componentes software que intervienen en este complejo sistema, donde también se integra información geográfica, pueden considerarse como un SIG aplicado a la gestión del agua. Varios ejemplos de GIS-WM utilizados en diferentes partes del mundo son los trabajos de (Shamsi, 1996) en Pensilvania (EE.UU.), (Mckinney et al., 2002) en Asia Central, (Calera Belmonte et al., 1999) en La Mancha (España), (Naphade et al., 2011) en Brasil, y (Satti et al., 2004) en Florida (EE.UU.).

El objetivo principal de este proyecto es desarrollar una solución software para los diferentes retos que presenta la empresa de gestión del agua en la ciudad de Las Palmas de Gran Canaria (Islas Canarias, España). El primer paso es gestionar datos para emitir consultas avanzadas sobre el estado de la red de agua. En el pasado, no se podían responder consultas específicas porque el modelo de datos era genérico y carecía de adaptabilidad a todas las especificaciones de las características de una red de agua en una isla. Al mismo tiempo, el modelo de datos genérico tenía muchos campos innecesarios que generaban mayor confusión a los técnicos de la empresa gestora de agua.

En segundo lugar, la empresa tenía serios problemas con la calidad de los datos; por ejemplo, discontinuidades de la red de agua, así como otras cuestiones topológicas y alfanuméricas. Esta situación solía provocar inconsistencias en los datos que generaban serios problemas en el día a día de las operaciones de la empresa gestora de agua.

En tercer lugar, surgían problemas de interoperabilidad con el software, ya que no todas las conexiones y cargas de datos podían ejecutarse a menos que se adquirieran más licencias de módulos, y ese es exactamente el cuarto problema: las licencias. A pesar de no cubrir las necesidades reales de la empresa, el software propietario requiere servicios de mantenimiento que suponen un desembolso económico.

Se han desarrollado varias soluciones para algunos de estos desafíos individualmente en la literatura. Por ejemplo, (D. Huang et al., 2010) presentan una metodología para diseñar un sistema de distribución de agua flexible que haga frente a las incertidumbres y pueda adaptarse a nuevos requisitos cambiantes; (P. U. B. o. Singapore, 2016) implementa una red hídrica inteligente, integrando tecnologías de información y comunicaciones (sensores, medidores, controles digitales) para garantizar que el agua se entregue eficientemente y con buena calidad; y (Di Nardo et al., 2017) estudian la identificación de características de redundancia en redes de distribución de agua. Se pueden ver más ejemplos en el libro de (Christodoulou et al., 2017), donde se detalla completamente el espacio problemático de evaluar las vulnerabilidades, fallas y riesgos de los sistemas en las redes urbanas de distribución de agua.

El sistema presentado representa una pieza importante en la política de la empresa de gestión del agua, incluidas las decisiones sobre el suministro de agua y la sostenibilidad. Los tomadores de decisiones que diariamente se encargan de asegurar un buen servicio en la ciudad utilizarán los requerimientos de la red de información para mejorar la

calidad del servicio de abastecimiento y alcantarillado y establecer nuevas políticas para la situación hídrica de la isla.

Más detalladamente, nuestra propuesta es relevante, por ejemplo, para planificar cortes de red claramente para el suministro de agua. Es fundamental asegurar que los cortes afecten al mínimo número de clientes posible así como garantizar el suministro de agua hacia infraestructuras críticas como hospitales, colegios, etc.

Además, en las complejas tareas necesarias para mantener técnicamente la red, es de ayuda una estructura histórica para inspeccionar datos sobre estados anteriores de la red. Esto permitiría recuperar rápidamente todas las modificaciones realizadas durante la planificación de la red y garantizaría la coherencia en la funcionalidad de toda la red, lo que puede ser crucial en las decisiones de sostenibilidad.

7.3. Métodos para Diseñar un GIS-WM Usando FOSS

A medida que surgen nuevas necesidades en el contexto de las ciudades inteligentes, y debido al importante papel de las empresas de gestión del agua en ellas, los sistemas de información geográfica ya no son piezas de software aisladas y estáticas. En esta línea, disponer de un modelo de datos accesible abriría el camino hacia el desarrollo de nuevas tareas analíticas que ayuden en el día a día de las empresas de gestión del agua. Estas tareas también se adaptarían a los requisitos específicos de dichas empresas.

Debido a la existencia de varias fuentes de información provenientes de sistemas internos y externos, un GIS-WM debe ser lo suficientemente flexible para integrarlas ofreciendo interoperabilidad de bases de datos. Además, la capacidad de controlar directamente la información debería ser posible para gestionar datos ráster, publicarlos en un servicio, IDE, concretamente mediante WMS y conectarse a diferentes soluciones de software SIG para resolver diferentes problemas.

En lugar de proporcionar un sistema simple para almacenar redes de agua digitalizadas, un GIS-WM debería implementar capacidades inteligentes como ayudar en la resolución de errores de la red mientras se digitaliza y ayudar en la ejecución de tareas complejas de geoprocésamiento analítico. Finalmente, el sistema también debería permitir consultar información pasada y, si es necesario, restaurar el sistema a cualquier fecha pasada.

Dadas las consideraciones anteriores, la implementación del GIS-WM puede aprovechar numerosas ventajas del ecosistema de Software Libre y de Código Abierto, que permite la posibilidad de utilizar, estudiar, modificar, copiar y redistribuir el código fuente. Esta libertad trae varios beneficios, como evitar el bloqueo tecnológico debido a licencias restrictivas y mejorar la reutilización del software. Las empresas también pueden beneficiarse del software libre porque pueden reducir sus gastos de licencia y personalizar su software.

El Sistema de Gestión de Base de Datos (SGBD) elegido para implementar el GIS-WM es PostgreSQL con su extensión espacial PostGIS. PostGIS es considerado uno de los software de gestión de datos geográficos más potentes y maduros del mercado

geoespacial, como se comenta en (Akbari et al., 2014).

El software utilizado para conectarse a PostgreSQL es QGIS, un proyecto FOSS muy conocido y exitoso en el campo de SIG. Tiene la licencia pública general GNU y se ejecuta en sistemas Linux, Unix, Mac OS X, Windows y Android. QGIS tiene capacidades como cargar datos de los estándares Open Geospatial Consortium, conectividad con múltiples fuentes de sistemas de administración de bases de datos e integración con varias herramientas de geoprocésamiento. También brinda la posibilidad de agregar funciones personalizadas para abordar las necesidades específicas del usuario ampliando sus funcionalidades con complementos de Python. Estas características hacen de QGIS un gran candidato para el ecosistema de un GIS-WM personalizado.

7.3.1. Diseño del Modelo de Datos

El diseño del modelo de datos fue el primer paso para crear el GIS-WM. Se considera una de las partes más importantes de cualquier Sistema de Información (E. Codd, 1970). Las tecnologías pueden cambiar con el tiempo, pero un modelo de datos bien diseñado permanece inalterable. Ésta es la razón para centrarse y utilizar los recursos necesarios para crear el nuevo modelo de datos. Para este estudio, un modelo de datos personalizado que satisfaga los requisitos de una empresa determinada parte de la base de un modelo de datos genérico. El proceso explicado se muestra en la Figura 7.1.

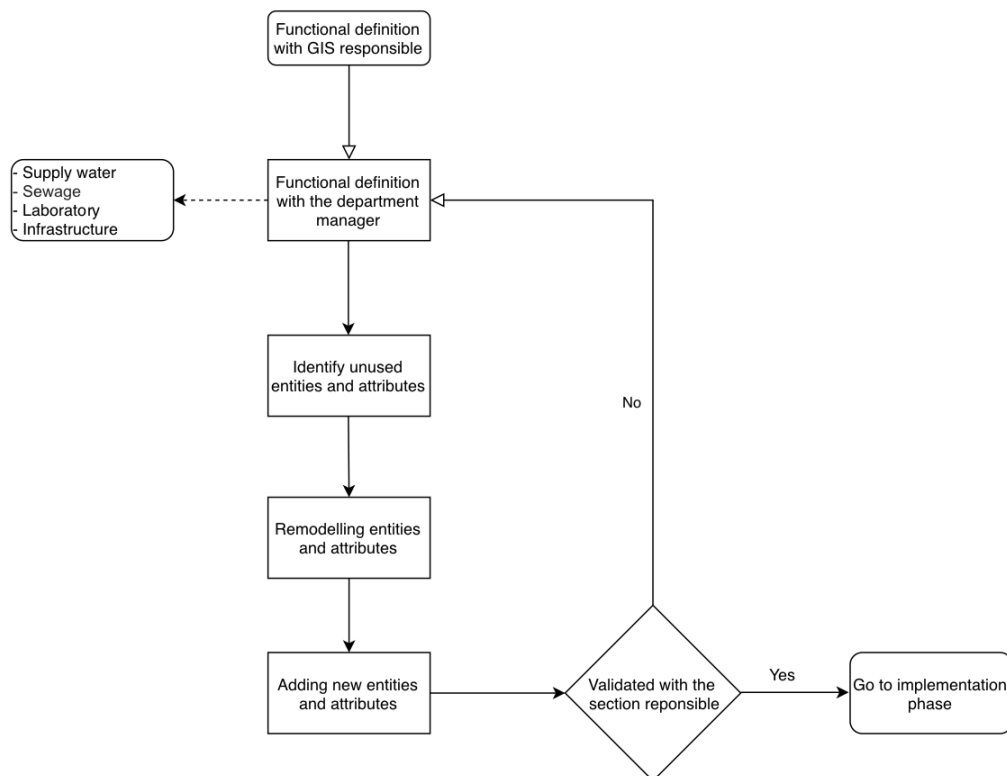


Figura 7.1: Definición del proceso de diseño del modelo (Fernández Moniz et al., 2020).

El diagrama de flujo describe un proceso para la gestión y remodelación de entidades y atributos dentro de un sistema, probablemente en un contexto relacionado con la infraestructura, suministro de agua, alcantarillado, laboratorio o algún otro servicio técnico, como se indica en la entrada lateral. A continuación, se explican los pasos de forma detallada:

1. Definición Funcional con el Responsable de GIS:

- El proceso comienza con una definición funcional realizada por el responsable de los Sistemas de Información Geográfica. Esta etapa es crucial para establecer los requisitos y objetivos técnicos específicos del sistema.

2. Definición Funcional con el Gerente del Departamento:

- A continuación, se lleva a cabo una segunda definición funcional, esta vez con el gerente del departamento. Esta etapa implica afinar los detalles funcionales desde una perspectiva del responsable, para asegurar que las necesidades del departamento se reflejan correctamente en la planificación.

3. Identificación de Entidades y Atributos No Utilizados:

- En este paso, se identifican aquellas entidades y atributos que ya no son necesarios o que no están siendo utilizados de manera efectiva. Este análisis es clave para optimizar el sistema, eliminando datos redundantes o irrelevantes que puedan dificultar su funcionalidad.

4. Remodelación de Entidades y Atributos:

- Una vez identificados los elementos no utilizados, se procede a la remodelación de entidades y atributos. Este proceso implica modificar, ajustar o actualizar los datos para mejorar su relevancia y alinearlos con las necesidades actuales del sistema.

5. Añadiendo Nuevas Entidades y Atributos:

- Después de la remodelación, se agregan nuevas entidades y atributos. Este paso se enfoca en ampliar la base de datos con nuevos elementos que puedan aportar valor y funcionalidad al sistema.

6. Validación con el Responsable de la Sección:

- La remodelación y adición de datos no se implementan inmediatamente; primero deben ser validadas por el responsable de la sección correspondiente. Esta validación garantiza que los cambios realizados son adecuados y cumplen con los estándares y requisitos del sistema.

7. Decisión de Validación:

- Aquí, se toma una decisión crucial:
 - Sí: Si los cambios son aprobados, se procede a la fase de implementación.

- No: Si no se aprueban, se retorna al paso de definición funcional con el gerente del departamento para revisar y ajustar lo necesario, creando un ciclo de retroalimentación hasta que los cambios sean satisfactorios.

8. Ir a la Fase de Implementación:

- Finalmente, una vez validados los cambios, se pasa a la fase de implementación, donde se aplican todas las modificaciones aprobadas en el sistema.

Este diagrama refleja un ciclo de mejora continua, donde cada modificación es cuidadosamente evaluada y ajustada para garantizar que el sistema funcione de manera óptima y cumpla con los requisitos establecidos por los responsables técnicos y gerenciales.

La Tabla 7.1 muestra la tasa de compresión lograda en una muestra de entidades compartidas por el modelo de datos genérico y que fue personalizado para el caso concreto de la empresa de aguas de Las Palmas de G.C. Es claramente visible que el nuevo modelo de datos logra una reducción significativa del número de atributos utilizados para representar las entidades. Por tanto, resulta un modelo mucho más ligero y eficiente adaptado a las necesidades reales de la empresa.

Entidades	Anterior. atributos	Nuevos atributos	Tasa de compresión (%)
Filtros	44	25	55,82
Conexiones	47	26	55,32
Tuberías	53	32	60,38
Recintos	55	27	49,01
Válvulas	62	22	53,23

Tabla 7.1: Tasa de compresión en el nuevo modelo de datos (Fernández Moniz et al., 2020).

Este nuevo modelo de datos consigue una reducción significativa del número de atributos utilizados para representar las entidades. Por tanto, resulta un modelo mucho más ligero y eficiente adaptado a las necesidades reales de la empresa. El nuevo modelo de datos se puede visualizar fácilmente en QGIS, donde las capas se cargan directamente desde una base de datos PostgreSQL con extensión PostGIS, como se puede ver en la Figura 7.2.

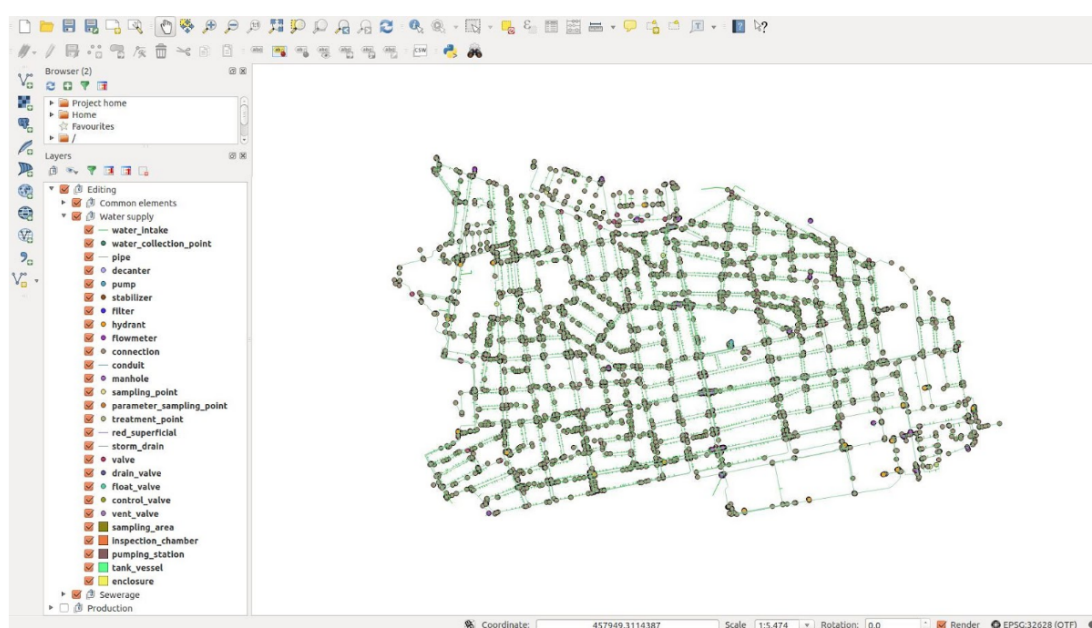


Figura 7.2: Red de muestra mostrada en el cliente QGIS usando el modelo de datos personalizado (Fernández Moniz et al., 2020).

7.3.2. Agregando Flexibilidad para los Digitalizadores: Bases de datos de Edición y Producción

El trabajo diario de los digitalizadores implica realizar cambios continuos en la red, pero dichas modificaciones deben satisfacer varias restricciones y validaciones para mantener una red confiable y útil para garantizar que los usuarios siempre consultarán un estado correcto de la red. Estas restricciones y validaciones se explican en la sección 7.4. Para lograr la flexibilidad deseada para los digitalizadores y mantener verificada la red final, el sistema se separó en dos bases de datos principales:

1. Base de datos de edición: donde los digitalizadores deben realizar cambios en la base de datos durante su trabajo diario. En la base de datos de edición, los datos solo persisten si pasan un conjunto de restricciones críticas definidas como "nivel 1" que explicaremos más adelante.
2. Base de datos de producción: donde se almacena el estado 'oficial' de la red de gestión del agua, y no se permiten modificaciones directas. Todos los elementos de esta base de datos deben cumplir con todas las restricciones y validaciones definidas para la red.

La forma en que funcionan ambas bases de datos es la siguiente: un administrador debe validar todos los cambios realizados por los digitalizadores e importarlos a la base de datos de producción. Este proceso de importación verifica todas las restricciones y validaciones y, solo si tienen éxito, todos estos cambios se incluyen en la base de datos de producción. De esta manera, los digitalizadores pueden realizar su trabajo con suficiente flexibilidad y la red almacenada en la base de datos de producción siempre está verificada, lo que garantiza un conjunto de datos robusto y coherente.

Ambas bases de datos también están conectadas a una base de datos adicional, cada una de las cuales almacena todo el historial de cambios. Estas bases de datos permiten recuperar información histórica cuando sea necesario como se explica con más detalle en una sección posterior. La arquitectura general del sistema se puede ver en la Figura 7.3.

7.3.3. Conexión con Sistemas Externos: Activos y Gestión Comercial

En este caso de estudio existen dos sistemas externos importantes: la gestión de activos y la gestión comercial. El sistema de gestión de activos se implementa utilizando una base de datos Oracle 11g y representa un inventario de todos los activos de la empresa, incluidas las plantas de producción, infraestructuras e instalaciones. El sistema de gestión comercial utiliza un servidor AS/400 y guarda toda la información relacionada con los clientes. Es importante que las empresas conecten sus diferentes sistemas entre sí (Robles et al., 2015) y SQL/MED proporciona una solución a este problema, como se comenta en (Melton et al., 2001). El GIS-WM propuesto se puede ampliar con herramientas inteligentes personalizadas que proporcionen nuevas capacidades. En las siguientes secciones del artículo se explican en detalle cuatro herramientas inteligentes diferentes

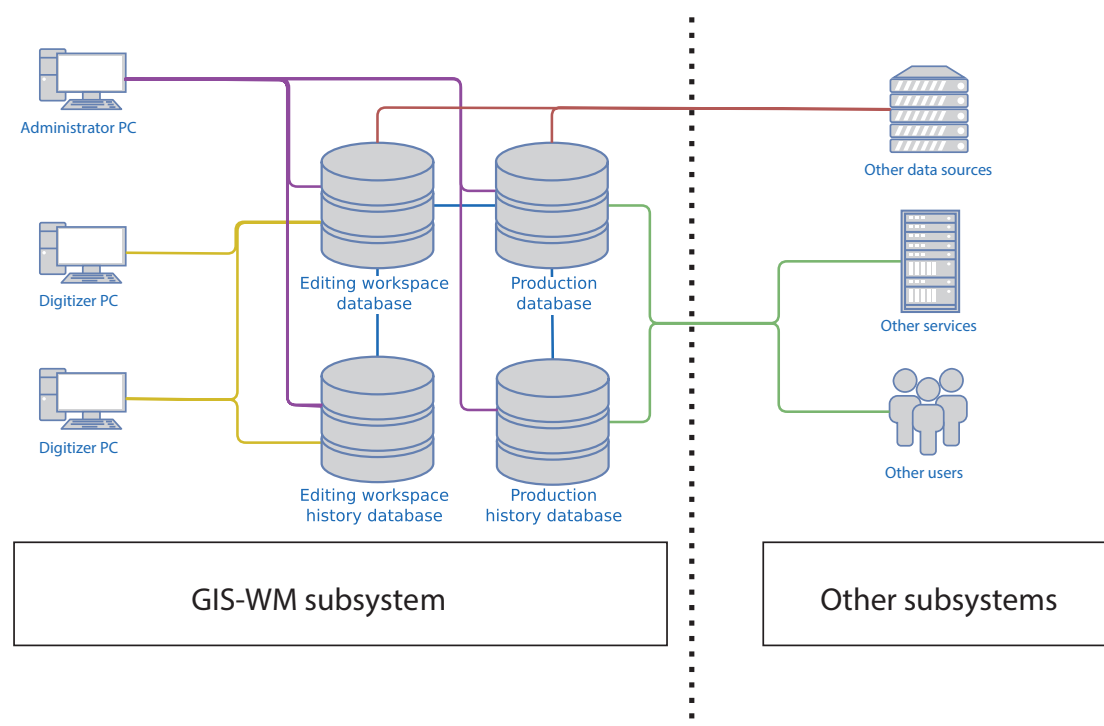


Figura 7.3: Arquitectura general del GIS-WM propuesto (Fernández Moniz et al., 2020).

que se han desarrollado. En la Figura 7.4 puede verse el esquema de conexiones con sistemas externos.

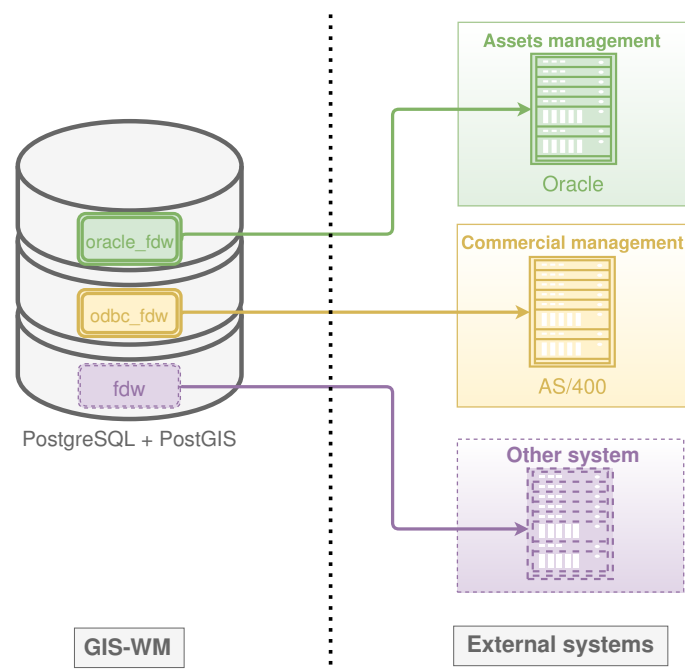


Figura 7.4: Conexión de la base de datos del SIG con la gestión de activos (Oracle) y la gestión comercial (AS/400) (Fernández Moniz et al., 2020).

7.4. Validaciones de Redes de Agua: Asegurando la Integridad y Robustez

Para una empresa que ofrece un servicio tan importante como es la gestión del suministro de agua y aguas residuales, es fundamental garantizar la integridad y robustez de los datos de su red. Para lograr este requisito se introduce un conjunto de reglas que verifica que se cumplan todas las restricciones definidas. En este apartado se describen dichas validaciones en función de la inclusión de operaciones geográficas y en función del momento en que se ejecutan. Finalmente, se expone una descripción del proceso para realizar modificaciones de la red.

Para categorizar las validaciones de redes, con base en la existencia de restricciones topológicas, se define como restricción una validación que involucra operaciones geométricas o geográficas mientras que las no topológicas las utilizan. Se puede ver una categorización más detallada en la Figura 7.5 donde las restricciones no topológicas se subcategorizan según el nivel de abstracción que afectan (sistema, red o entidad) mientras que las topológicas se dividen según si están relacionadas con la conexión entre elementos o están relacionados con conflictos de geometría. Las reglas no topológicas se subclasifican teniendo en cuenta si se aplican a todas las entidades del sistema, entidades de red o un solo tipo de entidad. Por otro lado, las restricciones topológicas se agrupan por sus conexiones (obligatorias o no permitidas) y restricciones de geometría. En la fase de implementación, intentamos generalizar las validaciones tanto como fuera posible para simplificar el mantenimiento del sistema. Esto significa que si necesitamos verificar una propiedad topológica, como "las líneas deben estar conectadas", esta propiedad se establece como genérica para poder ser reutilizada en otras entidades con la misma validación, como "las tuberías tienen que estar conectadas", validación en el modelo aplicable a la entidad tubería.

Actualmente, existen 77 restricciones no topológicas definidas en el sistema. Para aclarar este tipo de validaciones se proporciona un ejemplo para cada uno de sus subtipos:

1. Nivel Sistema: privilegios de creación o modificación, por ejemplo, sólo los usuarios con privilegios de digitalización pueden modificar la red.
2. Nivel de red: por ejemplo, los elementos de la red privada no pueden ser de tipo transporte, así los elementos que son propiedad privada no pueden utilizarse para recolectar agua para almacenarla en tanques de agua para su posterior uso en la red general.
3. Nivel entidad: como la relación entre diámetro y material, en este caso, el diámetro de las tuberías de material de fibrocemento debe ser inferior a 300 mm.

Además de las restricciones no topológicas, también se definen 172 reglas topológicas. Las reglas topológicas son fundamentales para garantizar la integridad espacial de los datos geográficos. Estas reglas definen las relaciones espaciales y geométricas que

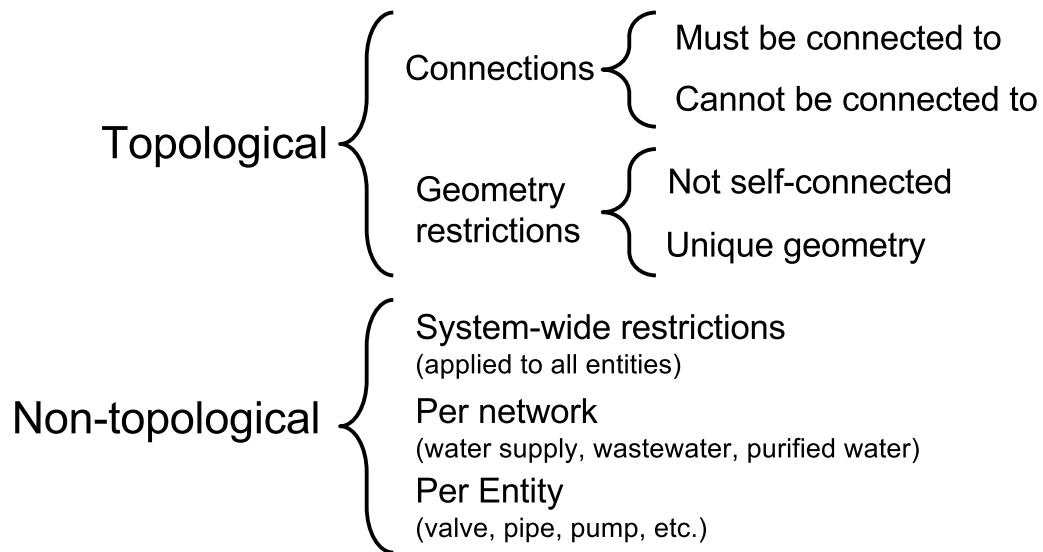


Figura 7.5: Categorización de restricciones detallada basada en la naturaleza de la validación (Fernández Moniz et al., 2020).

deben cumplirse entre las entidades del SIG, como la adyacencia, la conectividad y la contigüidad. El cumplimiento de estas reglas es esencial para la coherencia de los análisis espaciales y la fiabilidad de los modelos generados, permitiendo la detección de errores y la corrección automática de incongruencias en la geometría de los elementos. La Figura 7.6 muestra dos ejemplos de estas reglas topológicas, que ilustran las conexiones de elementos y las restricciones geométricas.

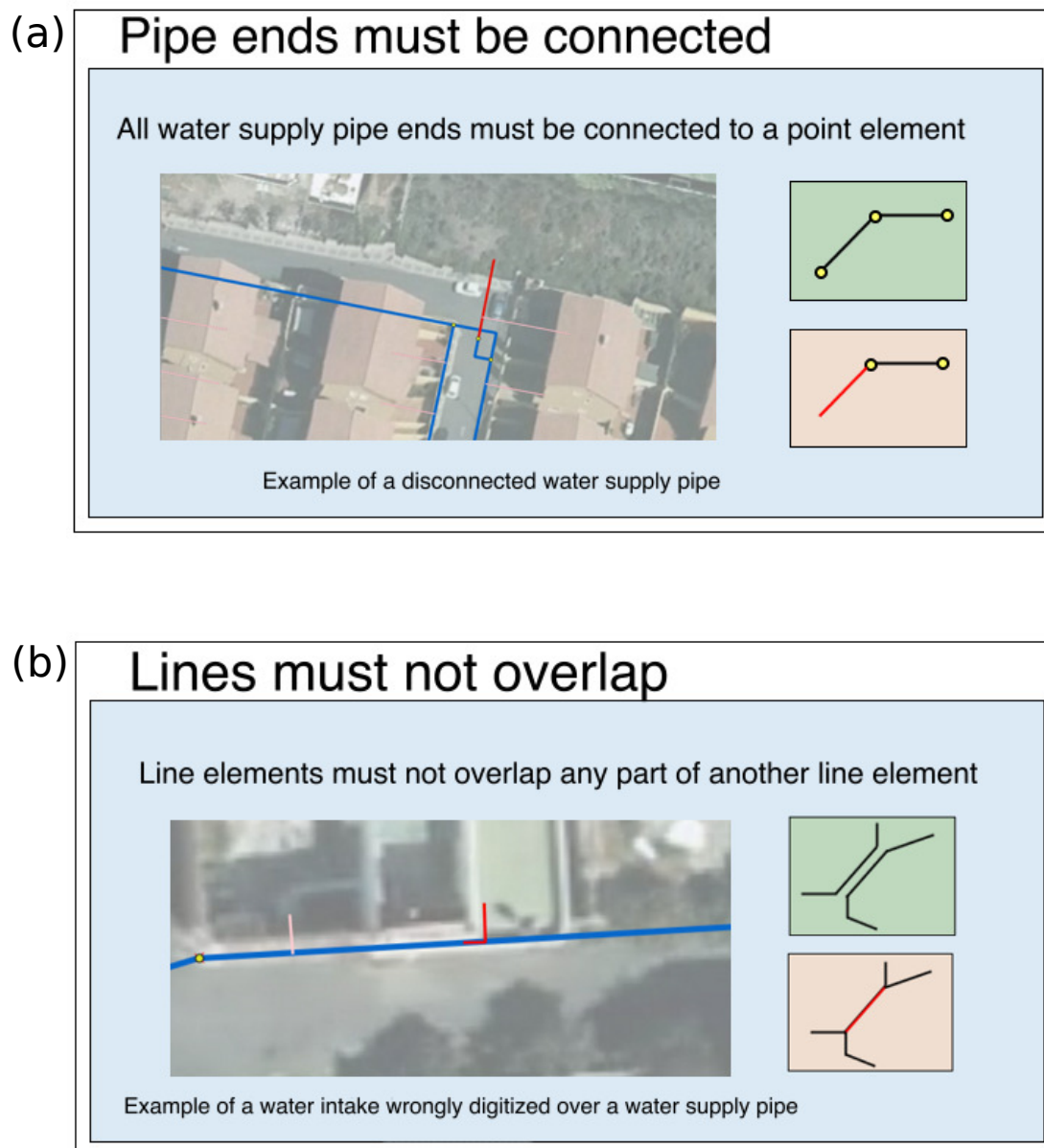


Figura 7.6: Dos ejemplos diferentes de restricciones topológicas: (a) ilustra la conexión adecuada de un elemento; en este caso, debe haber un elemento puntual en cada extremo de la tubería; (b) muestra una restricción geométrica que indica específicamente que un elemento de línea no puede compartir una ruta con otro elemento de línea (Fernández Moniz et al., 2020).

7.4.1. Categorización de las Validaciones de la Red Basadas en el Tiempo de Ejecución

Es importante destacar que los digitalizadores podrían no tener toda la información sobre los elementos de la red en el momento de la digitalización. En tal caso, necesitan guardar un estado parcial de la red para completar la información necesaria más adelante. Además, el sistema debe proporcionar suficiente información para que los digitalizadores corrijan una digitalización no válida. Esto unido a situaciones de multiconcurrencia; la multiconcurrencia refiere a la capacidad del sistema para permitir que múltiples usuarios accedan, editen y manipulen simultáneamente los datos geográficos dentro de una misma base de datos o proyecto SIG. Este concepto es crucial en entornos colaborativos donde varios usuarios necesitan trabajar de manera concurrente sin comprometer la integridad y consistencia de los datos. Para gestionar la multiconcurrencia, los SIG suelen implementar mecanismos como el bloqueo de registros, la versión de datos y el control de transacciones. Estos mecanismos aseguran que las modificaciones realizadas por un usuario no interfieran con las realizadas por otros, evitando conflictos y asegurando que los datos se mantengan precisos y actualizados para todos los usuarios. Esto es especialmente importante en aplicaciones donde la toma de decisiones depende de la información geoespacial más reciente y precisa.

Para permitir que los digitalizadores trabajen con gran agilidad, se debe lograr una detección temprana de errores críticos, evitando demoras excesivas en la validación de la red. Para ello, se pueden distinguir dos tipos diferentes de validaciones en nuestro sistema propuesto:

- Nivel 1 validaciones: son las más críticas y pueden detectarse en el momento de la inserción. Dos ejemplos de este tipo de restricciones son la superposición de geometrías (dos elementos lineales compartiendo un camino) o la combinación inválida de atributos (un elemento de la red que es privado y también pertenece a la red de transporte).
- Nivel 2 validaciones: incluyen tanto restricciones no críticas como restricciones que no pueden realizarse en el momento de la inserción. Están encapsuladas en una función de validación genérica que las ejecuta secuencialmente. Un ejemplo de este tipo de validación es la verificación de las conexiones entre elementos.

7.4.2. Ejecución del proceso de validación

Las validaciones se llevan a cabo en diferentes momentos. La Figura 7.7 ilustra el flujo de trabajo del proceso de validación durante una sesión de digitalización. El primer paso consiste en realizar modificaciones en la red utilizando un cliente GIS (QGIS). Una vez que se han realizado los cambios deseados, deben guardarse en la base de datos de edición. Si hay alguna infracción de validación de nivel 1, las modificaciones no se guardan en la base de datos. En su lugar, se notifica a QGIS sobre la infracción de validación de nivel 1, proporcionando información sobre el conflicto. QGIS retiene las

modificaciones y, con la ayuda del error informado, se deben realizar las correcciones necesarias y volver a intentar guardar las modificaciones.

Una vez que se cumplen todas las restricciones de nivel 1, todos los cambios se almacenan en la base de datos de edición. En este punto, es necesario ejecutar validaciones de nivel 2 y, si se cumplen, el sistema concluye que los datos son correctos y están listos para ser importados a la base de datos de producción. En caso de que existan errores, todos ellos se notifican. Utilizando la información proporcionada, el proceso debe reiniciarse realizando los cambios necesarios hasta que la digitalización sea correcta.

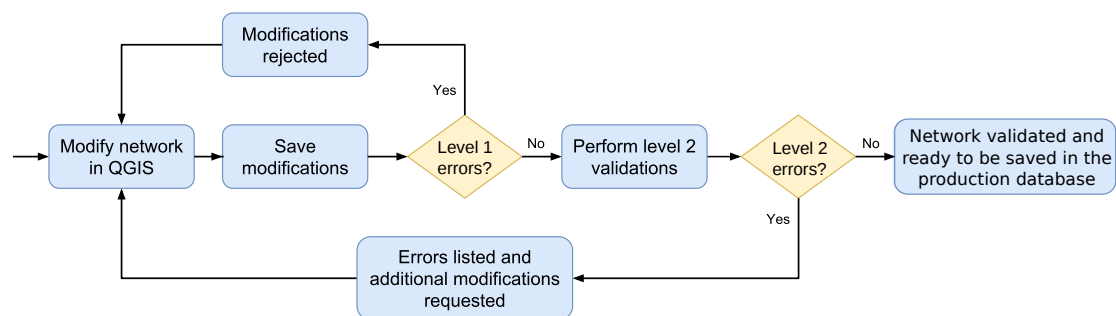


Figura 7.7: Flujo de trabajo de validación para realizar modificaciones en la red de agua.

Para facilitar la ejecución del proceso de validación descrito, se ha desarrollado un plugin para QGIS. Este plugin permite especificar si se debe validar toda la red o dibujar interactivamente un área de validación específica. Una vez establecida el área de validación, el plugin ejecuta el proceso de validación contra la base de datos y los errores encontrados se muestran en un visor de errores, que se puede ver en la Figura 7.8. Este visor se puede utilizar para navegar rápidamente a través de los errores encontrados, consultar sugerencias para resolver el problema actual, inspeccionar los IDs (llamados IPIDs en el sistema) de los elementos afectados, etc. Para cada error, también es posible acercarse directamente al elemento defectuoso y abrir la ventana del editor de atributos, lo que aumenta la velocidad a la que se pueden resolver los errores.

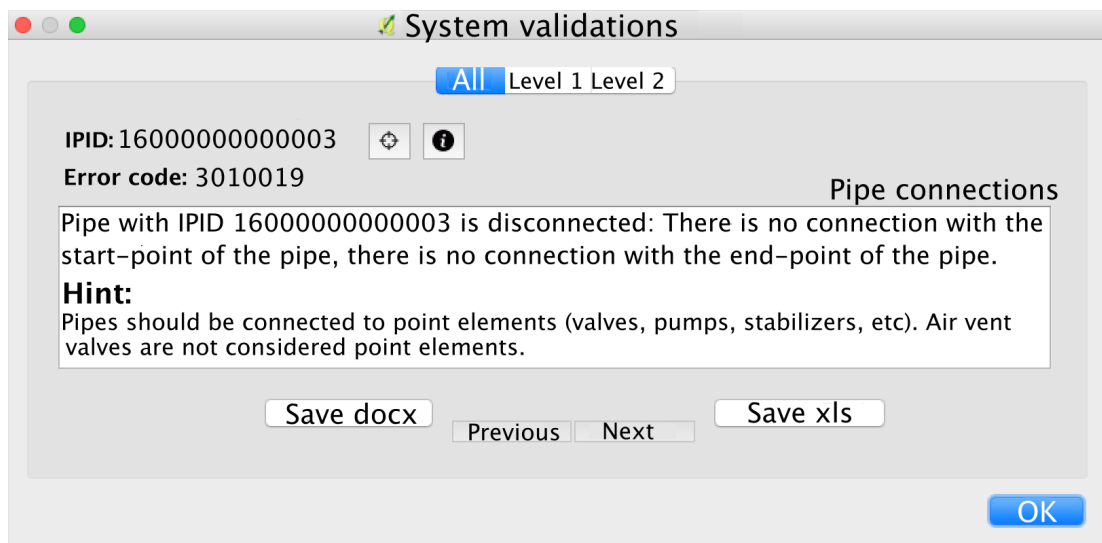


Figura 7.8: Error mostrado en el visor de errores del plugin. Una tubería no está conectada a ningún elemento. La sugerencia específica a los digitalizadores que una tubería debe estar conectada a un elemento puntual y recuerda que una válvula de ventilación de aire no se considera un elemento puntual (P. Fernández et al., 2016a).

Con el propósito de optimizar el proceso de validación, las verificaciones solo se realizan contra los elementos que pueden causar errores. Para poder implementar esta optimización, se ha añadido el campo *Estado de Validación* a todas las entidades, que puede tener los siguientes valores:

- Modificado: El elemento ha sido modificado directamente o por otro elemento conectado a él.
- Validado: El elemento ya ha pasado todas las validaciones.
- No Validado: El elemento no ha pasado el último proceso de validación.

Cabe destacar que un elemento puede ser modificado cuando se actualiza directamente o cuando otro elemento conectado a él se modifica. Así, si una tubería está conectada a dos elementos y uno de ellos se elimina o mueve, la tubería también se considera modificada.

Con la adopción del modelo propuesto, los digitalizadores pueden realizar su trabajo sin preocuparse por tener que digitalizar la red correctamente desde el principio. El proceso de validación proporciona sugerencias útiles si tienen alguna duda sobre cómo dibujar un elemento. Por lo tanto, incluso los nuevos digitalizadores pueden adaptarse fácilmente al sistema. Dado que todas las validaciones se implementan a nivel de base de datos, los usuarios pueden utilizarlas con cualquier programa GIS que soporte PostgreSQL/PostGIS, y las restricciones del modelo no pueden ser eludidas. Esto es muy importante para brindar movilidad a la empresa, ya que reduce la carga computacional y la lógica en los dispositivos móviles.

7.5. Simulación de Trazas de Agua

En las operaciones cotidianas de una empresa de gestión de agua, una de las tareas principales es el mantenimiento de las redes de suministro de agua y alcantarillado. Para garantizar un servicio eficiente, es crucial identificar las áreas y elementos afectados por problemas como roturas de tuberías o fugas de aguas residuales. Esto permite planificar interrupciones del servicio y desplegar soluciones de reparación adecuadas.

La herramienta de trazas de agua permite simular el flujo del agua a través de la red bajo distintas condiciones especificadas por los usuarios. Por ejemplo, los analistas de GIS-WM pueden configurar una simulación para que se detenga al encontrar una válvula cerrada. Esta funcionalidad les permite manipular diferentes válvulas, comparar los trazados de agua resultantes y tomar decisiones informadas sobre qué válvulas cerrar antes de iniciar cualquier trabajo de mantenimiento.

La herramienta se compone de dos módulos principales: una función de trazas en PL/pgSQL que realiza los cálculos intensivos y un plugin de QGIS que actúa como interfaz de usuario. La herramienta de simulación de trazado de agua ofrece varias opciones de configuración:

1. **Dirección del flujo de agua:** Este parámetro determina cómo se realiza el trazado. Si se selecciona aguas abajo, la traza se calcula desde el punto de inicio hasta el final en entidades lineales a favor de la gravedad o corriente de agua. Si se elige aguas arriba, el cálculo se invierte en contra a la gravedad o corriente de agua. Con la opción bidireccional, el trazado se calcula sin tener en cuenta la dirección de las entidades lineales.
2. **Elemento de inicio:** Es una estructura clave-valor que representa el elemento de la red desde el cual comenzará la simulación del trazado.
3. **Condiciones de parada:** Es una estructura clave-valor que describe en qué entidades debe detenerse la traza. En este objeto, cada clave corresponde a la tabla de

entidades y el valor a la consulta para encontrar el elemento de parada.

4. **Mostrar entidades:** Es una lista que contiene todas las entidades que se mostrarán en el trazado de agua. Aunque la simulación del flujo de agua se ejecute sobre todas las entidades del sistema, solo se devolverán como resultado del trazado los elementos de esta lista. De este modo el técnico solo obtiene la información que necesita.

El proceso general utiliza tres tablas temporales para controlar el flujo de la simulación de trazado de agua. La tabla de *trazas* almacena los elementos visitados que deben mostrarse en el resultado del trazado. La tabla de *elementos futuros* guarda los elementos que se visitarán en las próximas iteraciones de la simulación. Por último, la tabla de *elementos visitados* almacena todos los elementos que han sido visitados, independientemente de la condición de visibilidad, para evitar ciclos y bucles infinitos. La Figura 7.9 muestra el flujo de trabajo de la herramienta de simulación de trazado de agua.

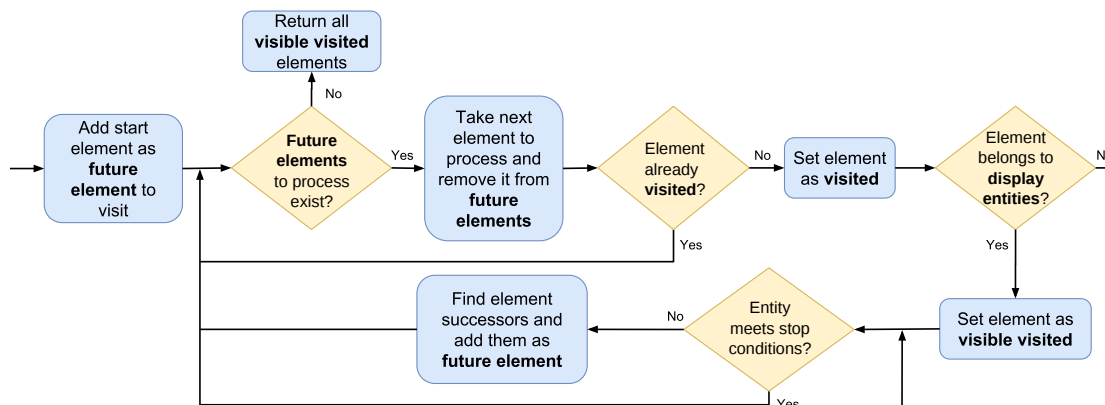


Figura 7.9: Flujo de trabajo de la simulación de trazado.

Para generar los sucesores, todas las entidades se agrupan en cuatro categorías basadas en su geometría y comportamiento de conexión: poligonales, lineales, nodales y no nodales. Las entidades nodales y no nodales son geometrías puntuales, pero la diferencia entre ellas es que las entidades no nodales no interrumpen el flujo de agua en las entidades lineales y se consideran conectadas en medio de una geometría lineal. Por otro lado, las entidades nodales solo se consideran conectadas a geometrías lineales si están ubicadas en sus puntos de inicio o final.

La primera diferencia que hace la simulación respecto a su categoría es que solo las entidades nodales y lineales pueden generar nuevos sucesores. Esto evita casos donde, por ejemplo, un polígono que incluye varias tuberías no conectadas inicie un trazado independiente del flujo principal de agua que se está simulando. La única excepción a esta regla es cuando estas entidades se pasan explícitamente como puntos de inicio para la simulación.

Otro aspecto importante de la generación de sucesores es que las entidades nodales tienen prioridad sobre las lineales para asegurar que las condiciones de parada funcionen

como se espera. Por ejemplo, dado dos tuberías conectadas por una válvula, si las condiciones de parada indican que la simulación debe detenerse en las válvulas y el generador de sucesores genera la segunda tubería como sucesora antes que la válvula, la función pasaría por alto la instrucción de detenerse en la válvula y continuaría el trazado después de ella.

La herramienta de simulación de trazado de agua proporciona una interfaz gráfica de usuario (GUI) implementada como un plugin de QGIS. El plugin guía a los usuarios en el proceso de definir los argumentos de entrada descritos en la implementación de la herramienta. En cada paso, se presenta una explicación detallada de los argumentos, mostrando cómo afectan la simulación del trazado de agua, para ser configurados adecuadamente. El plugin también permite a los usuarios guardar la configuración actual del trazado en archivos de texto plano, lo que les permitirá recargar la configuración en el futuro y evitar tener que reconfigurar trazados tediosos o muy comunes nuevamente. Una vez que los usuarios han definido su configuración deseada para el trazado de agua, pueden usar el plugin para calcular los trazados. El resultado del trazado se inserta automáticamente en una capa de mapa separada, para que el usuario pueda trabajar con ella de manera independiente. La Figura 7.10 muestra cómo se visualiza un trazado de agua resultante sobre la red original.



Figura 7.10: Resultado de la simulación de trazado usando válvulas cerradas como condición de parada visualizado en QGIS (Fernández Moniz et al., 2020).

7.6. Navegando a Través de Datos Históricos: una Máquina del Tiempo SIG

Uno de los principales requisitos dentro del departamento SIG de una empresa de agua es proporcionar informes basados en el estado del sistema en fechas específicas, para facilitar el intercambio de información internamente, o incluso con instituciones externas. Dado que la información requerida suele ser la misma, los técnicos generan informes genéricos periódicamente pero, en ocasiones, necesitan proporcionar información que no estaba contemplada en informes anteriores. En estos casos, los técnicos deben buscar en las copias de seguridad del sistema para restaurar los datos anteriores y generar el informe necesario, lo que hace que el proceso sea complejo y requiera mucho tiempo para los administradores. Este problema se agrava cuando la información que se va a recuperar está presente en estados de red entre dos copias de seguridad del sistema, por lo tanto, es información no recuperable.

En la sección anterior se introdujo la arquitectura de la base de datos para el GIS-WM desarrollado para mostrar que las bases de datos de edición y producción tienen asociada a cada una una base de datos histórica, donde se almacenan los cambios de datos. Estas bases de datos históricas mantienen la información de las entidades, el tipo de operación realizada (actualización, inserción o eliminación) y el rango de tiempo en que este registro estuvo actualizado.

Con el objetivo de facilitar la identificación de eventos importantes, el sistema implementa una tabla de hitos que proporciona al usuario una visión general de todas las acciones importantes realizadas en el sistema (importaciones y recuperaciones de datos).

7.6.1. Recuperación de Datos Históricos

La gestión eficiente de redes de suministro de agua urbana es un desafío complejo que requiere no solo una infraestructura robusta, sino también sistemas avanzados capaces de garantizar la continuidad y calidad del servicio. En este contexto, la implementación de un sistema que detecta cambios y puede recuperar la red a un estado anterior ofrece ventajas significativas sobre los métodos tradicionales basados en copias de seguridad puntuales. Este enfoque proactivo y dinámico mejora la resiliencia operativa, minimiza el impacto de fallos y optimiza la gestión de los recursos.

Una de las principales ventajas de un sistema de detección de cambios y recuperación es su capacidad para proporcionar una vigilancia continua y en tiempo real de la red de suministro de agua. Esto permite a las empresas identificar rápidamente cualquier anomalía o alteración en la red, ya sea debido a fallos técnicos, errores humanos o incluso ciberataques. Al detectar estos cambios de manera inmediata, las empresas pueden tomar medidas correctivas antes de que los problemas se conviertan en fallos críticos que afecten el suministro de agua.

Además, la capacidad de recuperar la red a un estado anterior proporciona una

capa adicional de seguridad y fiabilidad. En lugar de depender de copias de seguridad puntuales, que pueden no reflejar el estado más reciente de la red, este sistema garantiza que cualquier cambio inapropiado o fallido pueda ser revertido de forma eficiente y precisa. Esto es particularmente importante en situaciones donde los cambios en la configuración de la red pueden tener consecuencias significativas, como la alteración de la presión del agua o la calidad del tratamiento.

Otra ventaja clave de este sistema es la reducción del tiempo de inactividad y los costos asociados con la recuperación ante desastres. Los métodos tradicionales que dependen de copias de seguridad puntuales pueden implicar tiempos prolongados de restauración, durante los cuales el suministro de agua puede verse afectado. Con un sistema de recuperación basado en la detección de cambios, la red puede ser restaurada rápidamente al último estado conocido y estable, minimizando la interrupción del servicio y reduciendo los costos operativos asociados con las paradas no planificadas.

Este enfoque también facilita una gestión más ágil y adaptable de la red. Las empresas de suministro de agua pueden implementar cambios y actualizaciones con mayor confianza, sabiendo que cualquier problema puede ser revertido sin afectar significativamente el servicio. Esto fomenta una cultura de innovación y mejora continua, donde se pueden probar nuevas tecnologías y métodos sin el riesgo de provocar interrupciones graves en el suministro de agua.

La integración de tecnologías avanzadas, como el análisis predictivo y el aprendizaje automático, puede potenciar aún más las capacidades de estos sistemas. Por ejemplo, mediante el análisis de datos históricos y patrones de comportamiento de la red, es posible predecir problemas antes de que ocurran y realizar ajustes preventivos. Esto no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también contribuye a una gestión más sostenible y proactiva de los recursos hídricos.

En términos de seguridad, un sistema de detección de cambios y recuperación a estados anteriores ofrece una protección robusta contra las amenazas de seguridad informática. En un entorno donde las infraestructuras críticas son cada vez más susceptibles a ataques, tener la capacidad de revertir cualquier cambio no autorizado o malicioso proporciona una defensa esencial para mantener la integridad y la seguridad de la red de suministro de agua.

Una de las acciones más sencillas y utilizadas que se realizan frente a datos históricos es ver cómo era toda la red de agua en el pasado. La estructura de tabla histórica descrita anteriormente permite a los usuarios visualizar el estado de una red en el pasado y recuperar este estado pasado hasta el presente si se desea. Esta operación podría servir como base para procesos analíticos más complicados como comparar diferentes estados, detectar errores cometidos por un digitalizador específico y generar informes.

El sistema implementa un conjunto de vistas que facilita la obtención de un estado anterior del sistema. Los diferentes usuarios no necesitan analizar las mismas fechas de datos, lo que significa que cada usuario requiere una vista personalizada. Para lograr esto, estas vistas necesitan filtrar los datos históricos por fecha y por usuario. Esta información se recupera de una tabla del sistema que almacena qué *timestamp* se muestra

para cada usuario. Por lo tanto, cuando se cambia la *timestamp* en esa tabla, también se cambia el punto en el tiempo mostrado a un usuario específico. La Figura 7.11 muestra cómo se generan dos conjuntos de vistas para dos usuarios diferentes a partir de la tabla que almacena las marcas de tiempo.

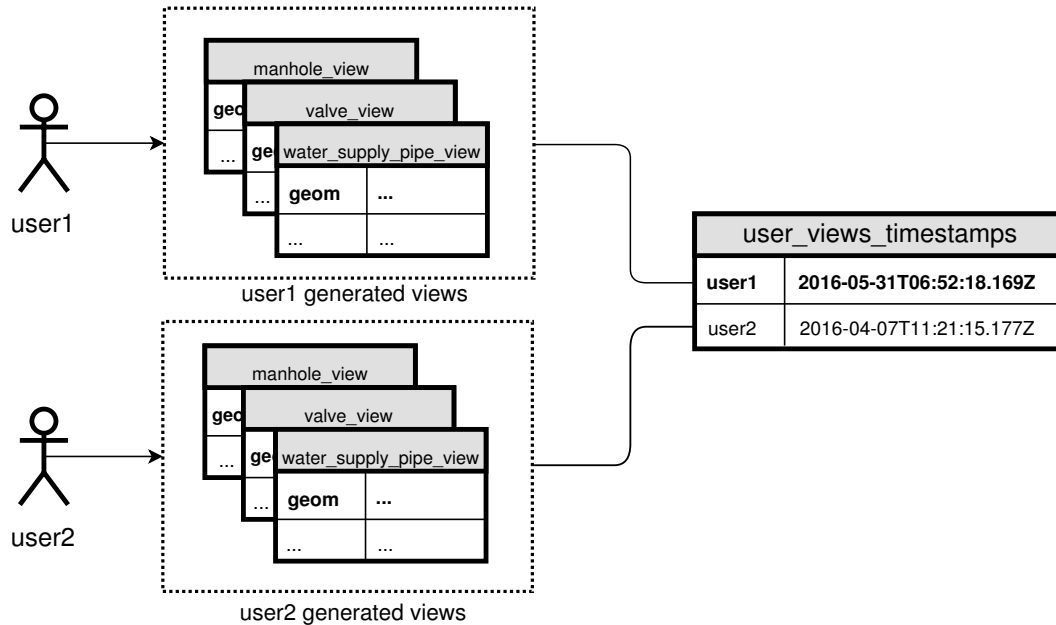


Figura 7.11: Usuarios accediendo a diferentes vistas generadas para cada uno de ellos usando la fecha especificada por cada uno.

Para simplificar cómo un usuario puede especificar la hora utilizada para mostrar sus vistas, se ha desarrollado un plugin para QGIS. Este plugin permite seleccionar una fecha y hora usando un calendario o seleccionarla de la tabla de hitos (Figura 7.12). Por ejemplo, cuando los técnicos detectan un posible error de digitalización relacionado con una toma de agua importada unos días antes, para resolver el problema, necesitan visualizar una comparación entre el estado actual de la red y el estado de la red antes de la importación. Los técnicos pueden crear un conjunto de vistas de cómo estaba el sistema antes de la importación seleccionando el *timestamp* usando el plugin.

Utilizando estas vistas, un técnico puede comparar los dos estados del sistema y verificar si la digitalización se realizó correctamente. Es importante destacar que las vistas de navegación pueden ser guardadas por el usuario en la base de datos, lo que permite comparar y trabajar con múltiples vistas del sistema en diferentes fechas. Con este sistema, los técnicos pueden realizar su trabajo de manera fluida y los administradores pueden verificar el estado de la red que se va a restablecer antes de llevar a cabo una restauración.

7.6.2. Restauración de Estados de Red Anteriores: Funcionalidad de Recuperación de un Punto en el Tiempo

La función de Recuperación Punto en el Tiempo, o *Point in Time Recovery* (PITR) se puede utilizar cuando los administradores del GIS-WM no están satisfechos con la

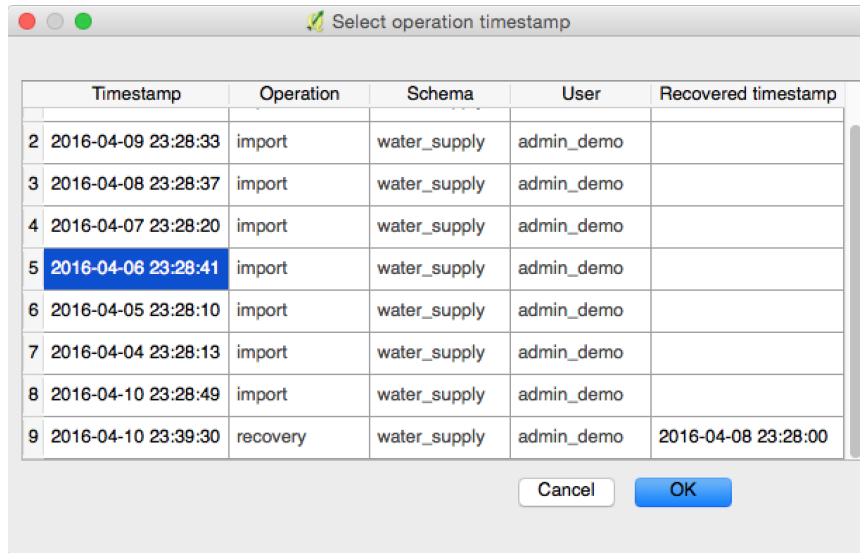


Figura 7.12: Selección de la timestamp desde una lista de operaciones usando el plugin proporcionado.

evolución de la digitalización de la red o requieren volver a un estado anterior de la red. Esta característica se presenta centrada en datos, a diferencia de otras estrategias diseñadas como copias de seguridad del sistema como el archivado continuo en PostgreSQL (PostgreSQL Continuous Archiving). Una diferencia importante con el archivado continuo de PostgreSQL es que esta función no pretende ser una copia de seguridad y no se eliminan entradas históricas cuando se ejecuta un PITR. Por el contrario, la operación de recuperación se logra realizando las inserciones, actualizaciones y eliminaciones necesarias para hacer coincidir el estado actual con el estado objetivo.

La implementación de la arquitectura histórica debe ser eficiente y efectiva para el almacenamiento, visualización y recuperación de cambios de datos. En el sistema desarrollado, todas las funciones y tablas genéricas se crean automáticamente en función del modelo de base de datos definido.

La Tabla 7.2 ilustra cómo se registran y mantienen los datos históricos en el sistema, destacando el uso de rangos de fechas para determinar la validez temporal de los registros.

Id	Attribute 1	Attribute 2	valid-date-range	Operation
20031	True	5	["2016-04-11 21:43:07.507211+01", "2016-04-11 21:47:53.5493+01")	UPDATE
20034	False	3	["2016-04-11 21:47:53.5493+01", infinity)	INSERT
45374	True	2	["2016-04-11 21:43:07.507211+01", "2016-04-11 21:47:53.5493+01")	UPDATE
33407	True	7	["2016-04-11 21:47:53.5493+01", infinity)	UPDATE

Tabla 7.2: Ejemplo simplificado de una tabla de datos históricos. Observe el uso de rangos de fechas para determinar en qué período de tiempo la fila es válida.

7.6.3. Implementación del Sistema de Gestión Histórica con PostgreSQL y MongoDB

Esta sección presenta una comparación entre dos implementaciones diferentes del sistema de gestión histórica. La primera implementación utiliza PostgreSQL como el SGBD para las bases de datos de edición, producción e históricas. La segunda implementación utiliza PostgreSQL para las bases de datos de edición y producción, pero MongoDB para ambas bases de datos históricas. MongoDB es una base de datos no relacional basada en documentos con un fuerte enfoque en la escalabilidad horizontal.

Después de analizar los resultados de la comparación del rendimiento de lectura y escritura entre MongoDB y PostgreSQL, se consideró MongoDB como una posible alternativa para implementar el sistema de almacenamiento histórico.

La Figura 7.13(a) muestra cómo las inserciones en MongoDB son mucho más rápidas que en PostgreSQL, con una tendencia a crecer de manera más controlada, mientras que la Figura 7.13(b) muestra la tendencia opuesta para el tiempo de recuperación. Sin embargo, el sistema compuesto conecta la base de datos de producción y edición de PostgreSQL a sus respectivas bases de datos históricas utilizando el FDW de MongoDB. En ambas figuras, 7.13(a) y (b), se puede observar que la implementación actual de MongoDB FDW deja a los desarrolladores con un comportamiento mixto entre las tendencias mostradas por los rendimientos de MongoDB puro y PostgreSQL puro. Con esta visión general, es interesante comparar el rendimiento de la funcionalidad de recuperación del sistema de gestión histórica, que consiste en operaciones tanto de lectura como de escritura.

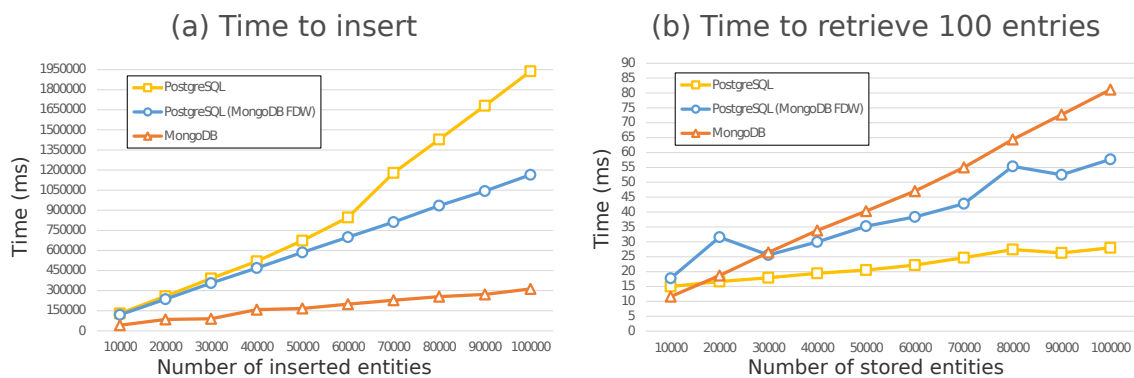


Figura 7.13: Comparaciones de tiempo de inserción y recuperación para bases de datos PostgreSQL, MongoDB y PostgreSQL con conexiones FDW a MongoDB.

Para comparar el rendimiento de ambas implementaciones se utiliza el mismo caso de prueba, que consiste en cargar sus bases de datos históricas actualizando e importando un conjunto de entidades hasta 100 veces para diferentes conjuntos de entidades iniciales. La Figura 7.14 muestra cómo el tiempo de recuperación para el sistema compuesto comienza a divergir rápidamente en comparación con la implementación con todas las bases de datos en PostgreSQL.

Estos resultados llevan a la conclusión de que la mayor demora en el tiempo de las

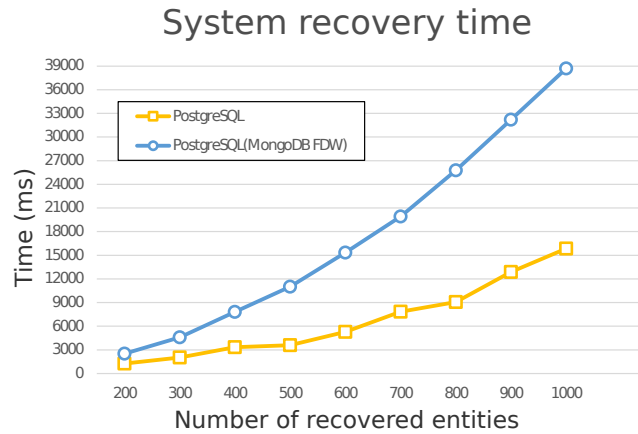


Figura 7.14: Comparación de recuperación del sistema entre la implementación de gestión histórica utilizando solo bases de datos PostgreSQL y el sistema compuesto de PostgreSQL y MongoDB conectados por MongoDB FDW.

operaciones de lectura es más importante que la demora en las operaciones de escritura, lo que explica la divergencia en la Figura 7.14 entre ambas implementaciones. Por lo tanto, la implementación actual que utiliza PostgreSQL en las cuatro bases de datos es la más eficiente para la funcionalidad de recuperación del sistema.

7.7. Cortes Inteligentes de Suministro

Hoy en día, los sistemas de información que realizan tareas inteligentes en lugar de simplemente mostrar información son cada vez más importantes (Bernard et al., 2014). El GIS-WM presentado introduce la detección de errores de digitalización y un sistema de notificación con sugerencias para solucionar esos errores. Este comportamiento mejora el flujo de trabajo de digitalización, pero debería ser necesario considerarlo como una característica inteligente, un procesamiento de información más elaborado.

En la gestión de redes de suministro de agua urbana, la capacidad de anticipar y gestionar interrupciones es fundamental para garantizar un servicio continuo y de alta calidad. La implementación de un sistema de simulación de cortes de suministro inteligente ofrece una serie de ventajas significativas en comparación con los métodos tradicionales. Este enfoque avanzado permite a las empresas de agua no solo prever y mitigar los impactos de los cortes de suministro, sino también optimizar la planificación y la respuesta ante emergencias, asegurando una operación más resiliente y eficiente.

Una de las principales ventajas de un sistema de simulación de cortes de suministro inteligente es su capacidad para modelar y analizar múltiples escenarios de interrupción en tiempo real. Esto permite a las empresas de suministro de agua evaluar el impacto potencial de diversas situaciones, como fallos de equipos, trabajos de mantenimiento programados o emergencias inesperadas. Al comprender cómo se comportará la red bajo diferentes condiciones, los gestores pueden desarrollar estrategias más efectivas para minimizar las interrupciones y asegurar la continuidad del suministro.

Además, estos sistemas de simulación inteligente permiten una planificación proactiva y optimizada de las operaciones. Por ejemplo, al simular cortes de suministro en diferentes puntos de la red, las empresas pueden identificar los puntos críticos y vulnerables que requieren atención prioritaria. Esto facilita una asignación más eficiente de los recursos y una planificación de mantenimiento más estratégica, reduciendo el riesgo de fallos y mejorando la resiliencia de la infraestructura.

La capacidad de simular cortes de suministro también proporciona una herramienta valiosa para la formación y capacitación del personal técnico. Mediante la recreación de escenarios de emergencia y la evaluación de la respuesta del equipo, las empresas pueden identificar áreas de mejora y asegurarse de que el personal esté preparado para manejar situaciones reales. Esta preparación es crucial para minimizar el tiempo de respuesta y garantizar una resolución rápida y efectiva de los problemas.

Otra ventaja clave de un sistema de simulación de cortes de suministro inteligente es la mejora en la comunicación y coordinación con los usuarios y otras partes interesadas. Al prever y planificar los cortes de suministro, las empresas pueden informar con antelación a los usuarios afectados, reduciendo el impacto negativo y aumentando la satisfacción del cliente. Asimismo, la coordinación con autoridades locales y otros servicios esenciales puede ser mejorada, asegurando una respuesta integrada y eficiente en caso de emergencia.

La integración de tecnologías avanzadas, como el análisis de datos y el aprendizaje automático, potencia aún más las capacidades de estos sistemas. Por ejemplo, mediante el análisis de patrones históricos y el uso de algoritmos predictivos, es posible identificar tendencias y anticipar problemas antes de que ocurran. Esto no solo permite una gestión más proactiva, sino que también contribuye a una mayor sostenibilidad y eficiencia en el uso de los recursos hídricos.

En términos de sostenibilidad, un sistema de simulación de cortes de suministro inteligente también apoya la gestión eficiente de los recursos hídricos. Al optimizar la planificación y la respuesta ante interrupciones, las empresas pueden reducir el desperdicio de agua y mejorar la eficiencia energética de sus operaciones. Esto es especialmente relevante en un contexto de creciente escasez de recursos y demanda de prácticas más sostenibles.

Finalmente, la capacidad de estos sistemas para simular y analizar cortes de suministro también mejora la toma de decisiones a largo plazo. Al proporcionar una comprensión detallada de cómo diferentes factores pueden afectar la red, las empresas pueden desarrollar planes de inversión y mejora más informados y estratégicos. Esto asegura que las infraestructuras de suministro de agua no solo sean resilientes y eficientes en el presente, sino que también estén preparadas para enfrentar los desafíos futuros.

Al utilizar la herramienta de simulación de trazas de agua presentada anteriormente, este sistema puede realizar tareas más complejas con modificaciones mínimas. Aunque no contemplamos utilizar directamente datos de IoT para este ejemplo, debería ser muy útil para enriquecer las funcionalidades de futuras herramientas (Whittle et al., 2013).

La planificación de los cortes de suministro es una operación crítica; Los técnicos deben asegurarse de que un corte de suministro afecte al mínimo número de clientes posible y garantizar el suministro de agua a infraestructuras críticas como hospitales. Es realmente útil tener una herramienta que calcule los mejores segmentos de red a cerrar para restringir el suministro de agua en una zona específica. Esta herramienta debería ayudar a minimizar el impacto de las operaciones teniendo en cuenta los clientes afectados, tipos de válvulas, etc.

Se ha desarrollado una solución sencilla para la planificación de los cortes de suministro con el objetivo de proporcionar a la empresa una herramienta avanzada que le ayude a mejorar la calidad de su servicio. Utilizando la herramienta de simulación de trazas de agua descrita anteriormente, es trivial obtener las diferentes alternativas para cortar la red utilizando las válvulas como condiciones de parada. La Figura 7.15 muestra dos alternativas diferentes con los diferentes segmentos de red afectados.

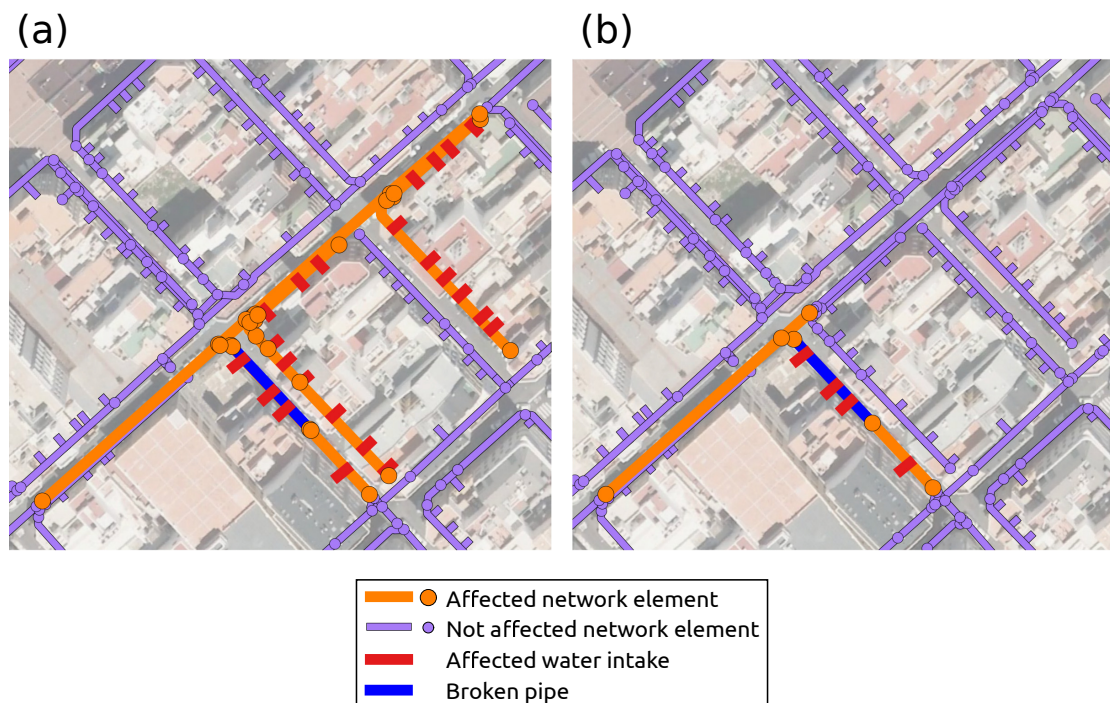


Figura 7.15: Cortes alternativos de suministro de agua por la misma tubería rota. Ambas opciones afectan a clientes con prioridad normal. Se prefiere la opción (b) a la opción (a) porque afecta a menos clientes (Fernández Moniz et al., 2020).

Una vez que el sistema ha computado las diferentes posibilidades se obtienen los clientes afectados para cada una de ellas. Para ello, el sistema capta todos los clientes relacionados con las tomas de agua afectadas mediante la conexión con el sistema de gestión comercial y clasifica las trazas según la importancia que tiene para garantizar el suministro de agua para ellos:

1. Suministro de alta prioridad: Esta categoría incluye trazas que contienen clientes que, por la naturaleza de sus actividades, no pueden quedarse sin suministro de agua. Ejemplos de este tipo de clientes son hospitales y estaciones de bomberos.
2. Suministro de prioridad media: Una traza pertenece a esta categoría cuando contiene clientes que, a pesar de prestar servicios menos críticos que los clientes de la categoría anterior, el sistema debe garantizar el suministro de agua siempre que sea posible. Entre dichos clientes se encuentran instituciones públicas (como escuelas, tribunales, etc.).
3. Suministro prioritario normal: Pertenecen a esta categoría los clientes que no necesitan ningún tratamiento especial.

Con toda la información recopilada, el sistema procede a evaluar cuál es la mejor opción. En este caso, se ha diseñado y escrito en CLIPS un sistema simple basado en reglas o *Rule Based System* (RBS) (Giarratano et al., 2005). El RBS diseñada selecciona los mejores lugares para cerrar la red en función de las trazas categorizadas, la cantidad de clientes afectados y otras propiedades de la traza. Cuando se cumple una regla para dos caminos de corte diferentes, el sistema marca lo mejor de ambos y no evalúa el resto de reglas para ese par. Después de comparar todos los pares de rutas de corte alternativas, el sistema decide cuál es la mejor ruta general para cortar el suministro de agua. Las reglas consideradas por la RBS son (en orden decreciente de ejecución):

1. Prioridad de suministro de agua: Selecciona los segmentos de red que sólo afectan a los clientes con menor prioridad de suministro.
2. Número de clientes afectados: Marca una traza como mejor que otra cuando afecta a un menor número de clientes.
3. Número de válvulas a operar y sus tipos: El camino con menos válvulas a operar se considera el mejor. Por otro lado, se prefiere operar válvulas de control remoto a operar válvulas de activación manual.

Con las reglas especificadas, si existen dos opciones para el corte de suministro, y ambas sólo afectan a clientes sin necesidades especiales relacionadas con el suministro de agua, el sistema elegirá el trazado que afecte a menos clientes. El asistente descrito es muy simple, pero podría mejorarse fácilmente incluyendo más características y escribiendo reglas adicionales y más complejas como:

1. Tiempo de drenaje esperado: Se priorizan los segmentos de red que drenan el agua en menor tiempo.

2. Distancia entre válvula: Cuanto menor sea la distancia que debe recorrer un técnico para operar todas las válvulas, mejor.
3. Obras en ejecución en la red: Esta regla consideraría si existen operaciones que se estén ejecutando actualmente en la red. Esta regla deberá utilizar la conexión con el sistema de gestión de activos (explicado en la Sección 2.3).

7.8. Pruebas y Rendimiento

Uno de los mayores desafíos en la sistematización de una realidad consiste en probar si el producto final se acerca a los requisitos y supone una mejora real para la empresa. Es por eso que hemos realizado durante todo el proceso de definición un sistema de control continuo y capacitaciones internas, para sincronizarnos con el personal de gestión del agua.

7.8.1. Encuesta de Satisfacción Antes y Después de Implementar el Sistema

Durante la primera fase del proyecto, se realizaron varias iteraciones con cada responsable de diferentes secciones de la empresa. Como se explicó en la sección 2.1, durante el proceso de definición tuvimos varias iteraciones para asegurar la alineación con la empresa gestora del agua. El principal proceso de comunicación se gestionó directamente de forma oral y con memorias de las reuniones.

Además, en la fase final de definición de los requisitos, se crearon varios registros para asegurar la sincronización con las necesidades y requisitos. Desde requisitos simples como permisos de cada rol diferente en el sistema (Figura 7.16) hasta definir los componentes y validaciones para cada entidad.

Además, se realizó una encuesta de satisfacción para medir las mejoras realizadas para la próxima iteración una vez utilizado el sistema. El público objetivo de esta encuesta fue todo el departamento SIG y las diferentes secciones de la empresa, dando un total de 18 participantes. Como resultado, podemos globalizar la satisfacción general del sistema implementado. Los resultados de esta encuesta se pueden ver en la Tabla 7.3.

7.8.2. Rendimiento Técnico de la Herramienta Desarrollada

Uno de los principales problemas que encontramos en la creación de esta herramienta de gestión del agua fueron las validaciones. Las validaciones son un gran punto a tener en un sistema conceptual o nuevo. Pero un sistema de validaciones muy restringido significa que toda la red debe cumplir todas las reglas. Este fue un problema principal en el proceso de implementación. Aunque la empresa gestora de agua garantiza que toda la red debería estar lista y terminada una vez finalizado el desarrollo, no pudieron cumplir con este requisito.

Para solucionar este problema, decidimos establecer un nuevo campo de bandera para mejorar el rendimiento del sistema. Este campo permite tener elementos con un estado incorrecto, como tuberías desconectadas. Pero la próxima vez que el digitalizador

Data Bases	System	admin	Digitazer	read user
CREATE	v	x	x	x
TEMP	v	x	x	x
CONNECT	v	v	x	x
Shema	System	admin	Digitazer	read user
USAGE	v	v	x	x
CREATE	v	v	x	x
Tables	System	admin	Digitazer	read user
INSERT	v	v	v	x
SELECT	v	v	v	v
UPDATE	v	v	v	x
DELETE	v	v	v	x
TRUNCATE	v	v	x	x
REFERENCES	v	v	x	x
TRIGGER	v	v	x	x

Figura 7.16: Definición de permisos (Fernández Moniz et al., 2020).

importe o valide algo en esta zona, surgirá una alerta. Esto ayuda al sistema a crear nuevos elementos, y al mismo tiempo ayudará a editar de forma progresiva los elementos antiguos que no cumplen con las validaciones.

Durante el proceso de desarrollo se llevaron a cabo pruebas más generales, tales como:

- Pruebas de concurrencia
- Pruebas de carga
- Pruebas unitarias sobre cada funcionalidad del sistema.
- Prueba funcional replicando todo el flujo de trabajo en el sistema.

7.9. Aportes Generales y Beneficios del GIS-WM

El sistema GIS-WM descrito en apartados anteriores puede aportar muchas ventajas a los gestores de las empresas de gestión del agua y a sus técnicos. Las ventajas más importantes son:

1. Mejor inversión en costos de software: las empresas pueden ahorrar dinero en costos de licencias e invertirlo en seguir mejorando sus sistemas.
2. Sin limitación de licencia por usuario: El departamento de técnicos no estaría limitado por el número de licencias adquiridas para planificar el número de

Resultados de la encuesta	
Pregunta cerrada	Promedio (de 1 a 5)
Evaluar de forma general las mejoras generales de la nueva herramienta	4,3
Evalúe el tiempo de carga en lugar de la herramienta anterior	5
Evaluar las mejoras en el día a día y herramientas específicas	3,9
Pregunta abierta	
¿Qué partes del sistema requieren mejoras?	
N/A	5,5 %
Nada	83,3 %
Debería ser genial tener herramientas avanzadas de edición de nodos de línea	11,1 %

Tabla 7.3: Resultados de la encuesta (Fernández Moniz et al., 2020).

personas autorizadas a trabajar en tareas de digitalización. Con acceso limitado de usuarios simultáneos, las empresas no pueden agregar en el mismo cronograma nuevos digitalizadores para ayudar con la edición de mapas durante picos de gran carga de trabajo. Si se adquirieran nuevas licencias, sería necesario adaptarlas a las fechas específicas en las que funcionarían los nuevos digitalizadores; de lo contrario, las empresas pierden dinero debido a las licencias no utilizadas. Con esta nueva implementación del sistema, el número de personas capaces de conectarse al sistema ahora solo está dictado por limitaciones técnicas y decisiones de gestión, dejando de lado las limitaciones puramente económicas debido a los costos de uso del software. La Figura 7.17 representa los costos por año en un período de 7 años al comparar el software GIS-WM y otros software licenciados en la empresa. Se pudo observar que existe un claro beneficio económico de la implementación del WMGIS en una perspectiva de mediano plazo.

3. Control sobre extensiones de software: esta solución no solo se conecta con el software de otros proveedores, sino que también está abierta para ampliar el soporte para otros subsistemas y tecnologías. Por lo tanto, las empresas pueden elegir qué ampliar y quién debe implementar esas extensiones.
4. Mejora de la calidad de la digitalización de la red: La implementación de un sistema de validación completo ayudaría a mejorar el flujo de trabajo de digitalización, afectando positivamente a la productividad de los digitalizadores y a la velocidad y calidad de la corrección de errores de la red.
5. Gestión de copias de seguridad mejorada: el sistema de gestión histórica presentado en este documento permitiría a los administradores recuperar el estado de la base de datos en cualquier instante deseado en lugar de un estado guardado en una copia de seguridad periódica.

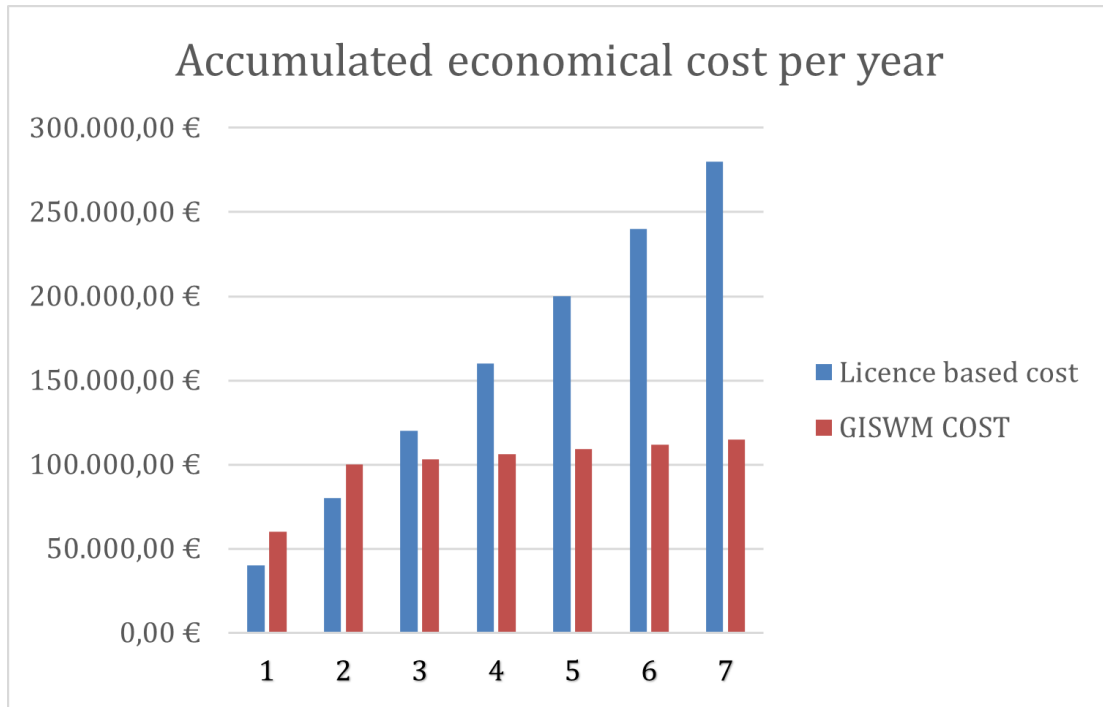


Figura 7.17: Costo por año al comparar el software GIS-WM y otro software con licencia en la empresa (Fernández Moniz et al., 2020).

Además de todos los beneficios anteriores, el sistema presenta la oportunidad de desarrollar funcionalidades más avanzadas que ayuden a mejorar el servicio prestado por la empresa y su eficiencia en el trabajo. En esta línea, otras posibles asistentes que se pueden desarrollar incluso que ya se han prototipado, utilizando la arquitectura implementada en el sistema y las conexiones con otros sistemas de datos de la empresa:

1. Detección de avería: en primer lugar, este asistente leerá continuamente los datos del sensor y cuando se encuentre una lectura inesperada, se notificará. La lectura inesperada de datos podría ser una diferencia mayor a un umbral entre el agua que ingresa a un segmento de la red y el agua que sale de ella o también podría ser una alta presencia de cloro en el agua. Posteriormente, el asistente deberá determinar dónde se pudo haber producido la falla, realizando un rastreo contra el flujo de agua utilizando como condición de parada los elementos de la red donde las medidas fueron correctas. Con los elementos obtenidos del trazado y teniendo en cuenta el tipo de avería, el sistema puede sugerir qué elementos se deben comprobar primero o solicitar medidas complementarias. Por ejemplo, si recientemente se ha realizado un trabajo cerca de la traza afectada, el sistema marca los elementos que estuvieron involucrados como posible causa.
2. Reemplazo y mantenimiento de la red: Este asistente sugiere qué sectores de la red deben ser reemplazados o necesitan mantenimiento. Para llegar a las zonas seleccionadas, el sistema, utilizando técnicas de minería de datos, busca patrones que conduzcan a la renovación de la red. Un ejemplo podría ser la identificación de un lote de tuberías defectuosas si se reemplazara una cantidad anormal de

tuberías antes de que finalice su ciclo de vida. Otro patrón podría ser calcular un ciclo de vida más preciso en función del material de la tubería, la presión del agua y los parámetros de composición del agua, como su dureza.

3. Asistentes basados en web: El uso de aplicaciones web donde se integra la información GIS-WM ofrece un gran abanico de posibilidades. Por ejemplo, ofrecer un servicio a la ciudadanía que permita comprobar si una vivienda está afectada por un corte de suministro o una avería. Esta característica se desarrollaría fácilmente utilizando el asistente inteligente para la planificación de cortes de suministro guardando a los clientes afectados para consultar los datos en una etapa posterior. Otro ejemplo sería la creación de un panel para técnicos como la aplicación Smartwater (ver Figura 7.18), caso presentado en el Barcelona Smart City Expo World Congress. Esta aplicación utiliza tecnología FIWARE para recopilar medidas de calidad del agua de los sensores. Los datos recopilados se cruzan con información SIG y luego se presentan a los analistas de redes de agua en un visor web. El objetivo principal es proporcionar un Sistema de Soporte a la Decisión (DSS), como el disponible en SmartPort (P. Fernández et al., 2016a), con un sistema de alerta de los valores dados por los sensores y ayudar a los operadores a controlar todo lo relacionado. a los ecosistemas acuáticos.



Figura 7.18: Recuperación de datos del sensor con la aplicación Smartwater. Las líneas azules representan las tuberías de la red de agua (Fernández Moniz et al., 2020).

7.10. SmartMetering como Herramienta Accesorio del GIS-WM

El GIS-WM funciona como una plataforma base para desarrollar nuevos sistemas, como la medición inteligente. Gracias a esto, se llevarán a cabo nuevas acciones que

promoverán un cambio de paradigma en los sistemas de gestión del agua, modificando la forma de proceder y permeando en las administraciones, empresas y usuarios finales, proporcionando una mayor eficiencia desde un punto de vista económico y de calidad de los servicios.

Uno de los desafíos en la gestión del agua es la renovación de la red de sensores. La ubicación de los sensores en la red es un elemento crucial para resolver, con el fin de evitar ataques terroristas, intrusiones y ataques físicos y químicos a la red. Una ubicación óptima de los sensores, junto con la EPA, definió que un sistema de advertencia de contaminación podría salvar la mitad de las muertes esperadas y más de 19 mil millones de dólares en impacto económico asociado en una red de agua de un gran municipio.

La ubicación de los sensores no solo es importante en casos extremos, sino también para el mantenimiento diario y la optimización de la red. Para localizar fugas en redes de tuberías, el uso de medición inteligente puede ser muy útil, contabilizando las diferencias de flujo de agua entre varias ubicaciones en la red a intervalos frecuentes. Todos estos datos masivos pueden utilizarse para construir un modelo predictivo que identifique lugares dentro de la red o incluso hogares con posibles fugas y proceder a repararlas. En este documento (Britton et al., 2013) se presenta un estudio sobre el uso de la medición inteligente y una política de comunicación con los propietarios de viviendas que permite identificar y reparar fugas.

Las herramientas de medición inteligente son esenciales para complementar las acciones del lado de la oferta para gestionar los recursos hídricos urbanos y planificar las demandas futuras. La segmentación de clientes es una opción para aprender del comportamiento del usuario en relación con el consumo de agua. Este estudio requiere una comprensión clara del comportamiento del consumidor que ayude a deducir los comportamientos de los consumidores residenciales de agua, como se puede ver en (Jorgensen et al., 2014). Este sistema podría proporcionar recomendaciones, como un DSS, para diseñar información personalizada sobre el agua y cruzarla con otros servicios como la electricidad (Stewart et al., 2013). Como se presenta en (Makki et al., 2013), los autores segmentan específicamente los tipos de clientes mediante datos acoplados de agua y electricidad por hora para informar sobre la gestión coordinada de la demanda de agua y energía.

La planificación óptima de las redes de infraestructura de agua puede implementarse para manejar mejor las complejidades de la demanda de los esquemas de suministro de agua y esto puede lograrse utilizando la medición inteligente. La idea es capturar el conocimiento, como por ejemplo, la demanda promedio y máxima de los clientes en la red de distribución de agua urbana. Al detectar patrones de demanda, se pueden idear escenarios de ahorro de agua. Por ejemplo, la metodología desarrollada por (Gurung et al., 2014) y probada en (Gurung et al., 2015) ha demostrado ser poderosa para modelar los patrones de demanda de agua potable de los hogares para una variedad de escenarios de ahorro de agua.

Al ejercitar la recopilación de todos los conocimientos del cliente, se puede mejorar el diseño de una red de infraestructura de agua con impacto en actualizaciones rentables

de la red, gestionando las operaciones y los horarios de mantenimiento de los servicios públicos de agua. Esto resulta en un sistema de suministro de agua más eficiente que puede mejorar los beneficios de los servicios públicos, los desarrolladores y los consumidores (Gurung et al., 2015).

La Figura 7.19 muestra un esquema de la integración de la medición inteligente con el GIS-WM.

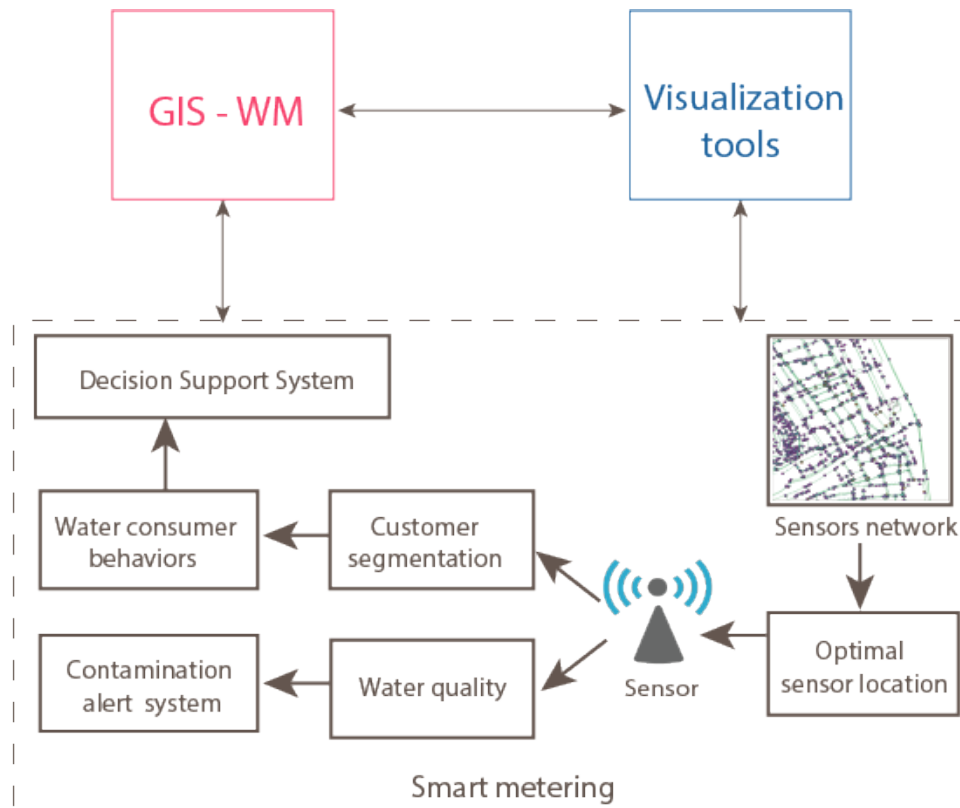


Figura 7.19: Arquitectura general que integra herramientas de medición inteligente.

Además, creemos que una herramienta de visualización para la red de monitoreo inteligente es una parte esencial para completar el sistema. La Figura 7.20 muestra un ejemplo de esto con SmartWater, que permite a los técnicos no solo visualizar los datos, sino también controlar el estado de los sensores de la red.



Figura 7.20: Visualización de una alarma de umbral de salinidad y el estado del sensor de la red a través de la aplicación web de agua inteligente SmartWater.

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Esta tesis aborda la importancia y el impacto de la integración de tecnologías avanzadas y arquitecturas inteligentes en la gestión de infraestructuras críticas. A lo largo de este trabajo, se ha puesto de relieve cómo la conjunción de Sistemas de Información Geográfica con tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial, el Big Data, y la computación en la nube, puede transformar radicalmente la manera en que se administran y optimizan los recursos y las operaciones en diversas áreas.

8.1. Conclusiones

Uno de los principales hallazgos es que la integración de tecnologías avanzadas, tales como el Big Data, en la gestión de infraestructuras, permite no solo el procesamiento eficiente de grandes volúmenes de datos geoespaciales, sino también la posibilidad de extraer patrones complejos y desarrollar modelos para la toma de decisiones. Esta capacidad predictiva es especialmente útil en el contexto de los entornos inteligentes, donde las decisiones basadas en datos en tiempo real pueden marcar la diferencia entre una operación eficiente y una deficiente, así como casos concretos, como se ha mostrado en la gestión de aguas.

Otro aspecto fundamental explorado en esta tesis es la adopción de arquitecturas orientadas a servicios, como las proporcionadas por plataformas tipo FIWARE. Estas arquitecturas son cruciales para lograr la interoperabilidad entre diferentes sistemas y la escalabilidad de las soluciones de gestión de infraestructuras. FIWARE, con su Context Broker, permite la centralización y distribución eficiente de la información contextual, lo que facilita una toma de decisiones más informada y precisa. Esta capacidad de integrar y gestionar datos en tiempo real provenientes de diversas fuentes, como sensores IoT, dispositivos móviles y sistemas de gestión existentes, es esencial para la operación efectiva de infraestructuras críticas en un entorno cada vez más complejo.

La modularidad y la flexibilidad de las arquitecturas orientadas a servicios permiten que los sistemas sean adaptables a cambios en las demandas operativas y tecnológicas. Esta adaptabilidad es fundamental en un mundo donde la tecnología evoluciona rápidamente y las infraestructuras deben ser capaces de absorber nuevas capacidades

sin requerir una revisión completa de sus sistemas. La capacidad de escalar estas soluciones para manejar un aumento en la cantidad de datos o para incorporar nuevas funcionalidades es uno de los mayores beneficios de este tipo de arquitecturas.

La adopción de estándares abiertos también asegura que los sistemas de gestión de infraestructuras sean más sostenibles a largo plazo. Al facilitar la interoperabilidad, estos estándares permiten que los sistemas sean más flexibles y adaptables a los cambios, lo cual es esencial en un entorno operativo en constante evolución. Además, la utilización de APIs estándar promueve una mayor colaboración entre diferentes organizaciones y sectores, lo que puede llevar a soluciones más innovadoras y efectivas.

La computación en la nube juega un rol crucial en la modernización de la gestión de infraestructuras. La tesis destaca que la nube no solo proporciona un entorno escalable y flexible para el procesamiento y almacenamiento de datos, sino que también reduce los costos y mantenimientos asociados con la infraestructura física. Las soluciones basadas en la nube permiten a las organizaciones manejar grandes volúmenes de datos de forma escalable sin la necesidad de invertir en costosos centros de datos locales, lo que democratiza el acceso a tecnologías avanzadas y permite a organizaciones de todos los tamaños beneficiarse de las capacidades de análisis y procesamiento de datos que la nube ofrece.

Además, la nube facilita la implementación de sistemas de alta disponibilidad y resiliencia, esenciales para la gestión de infraestructuras críticas. A su vez no es exclusiva, permitiendo arquitecturas híbridas, que combinan soluciones on-premises con la computación en la nube, se presentan como un modelo eficaz para aquellas organizaciones que necesitan mantener el control directo sobre sus infraestructuras, pero que también desean aprovechar la flexibilidad y la escalabilidad de la nube. Este enfoque híbrido permite a las organizaciones beneficiarse de lo mejor de ambos mundos, asegurando la continuidad operativa mientras se exploran nuevas capacidades tecnológicas.

Otro punto destacado que podemos concluir es la relación entre la eficiencia operativa y la sostenibilidad, y cómo las tecnologías avanzadas pueden contribuir a ambos. La integración de sistemas inteligentes de gestión permite optimizar el uso de recursos, como la energía y el agua, lo que no solo reduce costos, sino que también tiene un impacto positivo en el medio ambiente. La capacidad de monitorizar y gestionar recursos en tiempo real permite a las organizaciones ajustar sus operaciones de manera que minimicen el desperdicio y maximicen la eficiencia, contribuyendo a un modelo de operación más sostenible.

Finalmente, la tesis concluye que la integración de SIG con tecnologías emergentes dentro de arquitecturas flexibles y escalables no solo mejora la eficiencia y reduce costos, sino que también prepara a las organizaciones para enfrentar futuros desafíos con los datos geográficos y por ende, con cualquier evento que se desarrolle en el entorno geográfico. La capacidad de adaptarse rápidamente a nuevas tecnologías y demandas operativas es esencial en un entorno global cada vez más dinámico y complejo. La tesis demuestra que las organizaciones que adoptan estas tecnologías están mejor

posicionadas para innovar, mejorar su resiliencia operativa y contribuir a un desarrollo más sostenible.

Este enfoque no solo optimiza las operaciones geográficas actuales, sino que también proporciona una base sólida para la innovación continua. Las soluciones desarrolladas en esta tesis tienen el potencial de ser aplicadas en una amplia gama de sectores, desde la gestión de recursos naturales hasta la planificación urbana y la mitigación de riesgos, demostrando la relevancia y aplicabilidad de estas tecnologías para abordar los desafíos del mundo real.

8.2. Discusión de los Resultados

Los resultados de esta investigación han demostrado la viabilidad y efectividad de integrar Sistemas de Información Geográfica con tecnologías avanzadas, como la computación en la nube, para la gestión y el análisis de datos georreferenciados. Esta integración ha permitido no solo mejorar la eficiencia en el procesamiento de grandes volúmenes de datos, sino también obtener modelos predictivos precisos que pueden ser aplicados en la gestión de infraestructuras.

Un aspecto clave que se ha puesto de manifiesto es la capacidad de los SIG, en combinación con herramientas de análisis avanzado, para proporcionar una visión detallada y útil para la toma de decisiones. Sin embargo, la investigación también ha revelado ciertas limitaciones, principalmente relacionadas con la calidad de los datos disponibles. La precisión de los modelos generados estuvo directamente influenciada por la disponibilidad de datos actualizados y de alta resolución, lo que subraya la importancia de contar con fuentes de datos fiables y de buena calidad.

Además, la implementación de las herramientas desarrolladas requirió un alto nivel de especialización técnica, lo que podría limitar su adopción en organizaciones con menos recursos. A pesar de estos desafíos, los resultados obtenidos en la gestión de infraestructuras, como en el ámbito portuario y en el ciclo integral del agua, han demostrado que estas tecnologías tienen un gran potencial para mejorar la eficiencia operativa y la distribución de recursos.

Un aspecto relevante a considerar es la obsolescencia tecnológica, un fenómeno que puede impactar significativamente en la longevidad y utilidad de las aplicaciones desarrolladas. La rápida evolución de las tecnologías y la tendencia de las organizaciones a adoptar las últimas innovaciones pueden llevar a que soluciones tecnológicas, que aún son funcionales y eficaces, queden obsoletas en un corto período de tiempo. Esto no solo genera costos adicionales para la actualización o sustitución de sistemas, sino que también puede resultar en la pérdida de inversiones previas y en la discontinuidad de proyectos en curso. Por lo tanto, es fundamental que las nuevas aplicaciones se diseñen no solo para ser escalables y flexibles, sino también con una visión a largo plazo que considere la adaptabilidad a futuros avances tecnológicos. De esta manera, se puede mitigar el riesgo de obsolescencia y asegurar que las herramientas sigan siendo valiosas y utilizables en el tiempo, maximizando así el retorno sobre la inversión.

Unido al punto anterior, otro factor, difícilmente controlable en el marco de una tesis doctoral es el cambio de políticas e implementación de nuevas suites al existir cambios de cargos o cambio de titularidad propietaria en las compañías, que en muchas ocasiones desemboca en que aplicativos y proyectos pasen a desuso para implementar otros nuevos desde cero. Es por ello que se considera importante diseñar aplicaciones no solo con una escalabilidad técnica y de datos, sino además, se busque la garantía en el uso a lo largo del tiempo y utilidad de la misma. Un estudio interesante bajo este marco, sería realizar un análisis de la cantidad de recursos que se dedican a aplicaciones que a veces, ni llegan a ver la luz.

8.3. Implicaciones Prácticas

Las implicaciones prácticas de esta investigación son diversas y significativas. La capacidad de predecir patrones y tendencias a partir de datos geoespaciales ofrece una herramienta poderosa para la planificación y la toma de decisiones en tiempo real. En el contexto de la gestión de infraestructuras, por ejemplo, los modelos predictivos pueden anticipar problemas potenciales, optimizar la distribución de recursos y mejorar la eficiencia operativa. Esto es especialmente relevante en sectores como la gestión del ciclo integral del agua, donde la planificación a largo plazo es crucial para asegurar un suministro sostenible y eficiente. Asimismo para generar informes técnicos rigurosos que detecten, por ejemplo, un material de tubería, o tuberías con una fecha de instalación concreta que potencialmente genera problemas.

Otra implicación práctica importante es el desarrollo de herramientas personalizadas para el análisis de datos geoespaciales. Estas herramientas no solo facilitan el procesamiento de grandes volúmenes de datos, sino que también permiten una visualización clara y detallada de los resultados, lo que es fundamental para la interpretación y la aplicación práctica de los modelos generados.

8.4. Limitaciones de la Investigación

A pesar de los avances logrados, esta investigación no está exenta de limitaciones. Una de las principales limitaciones es la dependencia de la calidad y disponibilidad de los datos. La precisión de los modelos generados depende en gran medida de la calidad de los datos recolectados; en algunos casos, la falta de datos actualizados o de alta resolución limitó la capacidad de realizar análisis más detallados. Estas limitaciones sugieren la necesidad de desarrollar métodos más robustos para la normalización de datos y la implementación de estándares de calidad que aseguren la consistencia de los resultados. Además, sería beneficioso explorar soluciones tecnológicas adicionales que puedan mejorar la interoperabilidad entre diferentes sistemas y plataformas. La incorporación de técnicas avanzadas de procesamiento de datos, como la inteligencia artificial y el aprendizaje automático, podría ofrecer mejoras significativas en la capacidad de los sistemas para manejar y analizar grandes volúmenes de datos en tiempo real.

Siguiendo en los datos, una limitación importante de la metodología empleada fue la dependencia de datos históricos disponibles, que en algunos casos no se actualizaron con la frecuencia necesaria. Esto afectó la precisión de los modelos predictivos desarrollados. Además, la implementación de simulaciones para la gestión de infraestructuras críticas se basó en escenarios idealizados, lo que puede no reflejar con exactitud las complejidades del mundo real. Para mejorar este aspecto en futuras investigaciones, sería beneficioso incorporar fuentes de datos en tiempo real con mayor frecuencia de actualización, así como realizar pruebas más extensas en entornos reales para validar los modelos bajo condiciones operacionales diversas.

Otra limitación es la complejidad en el desarrollo e implementación de las herramientas personalizadas. Estas herramientas requieren un alto nivel de especialización técnica y acceso a recursos computacionales avanzados, lo que puede representar una barrera para su adopción en organizaciones con recursos limitados.

8.5. Trabajo Futuro

Con base en los resultados obtenidos y las limitaciones identificadas, se sugieren varias direcciones para futuras investigaciones. Una primera área de interés es la mejora de la calidad de los datos utilizados en los modelos. Futuras investigaciones podrían centrarse en desarrollar métodos para integrar fuentes de datos más precisas y en tiempo real, así como en la aplicación de técnicas avanzadas de limpieza y normalización de datos.

Otra dirección importante es la escalabilidad de las soluciones desarrolladas. Aunque los modelos fueron efectivos en los contextos estudiados, la gestión de volúmenes extremadamente grandes de datos sigue siendo un desafío. Por tanto, futuras líneas de trabajo podrían enfocarse en optimizar los algoritmos y arquitecturas de datos para manejar eficientemente conjuntos de datos más grandes. Entre otras opciones, se podría valorar la implementación en sistemas Cloud de nueva generación, tales como Big Query, Snowflake o Databricks. Igualmente, se debería analizar la posibilidad de aprovechar el potencial auge de la inteligencia artificial que estamos viviendo en la actualidad.

Así mismo, una evolución natural como sería el desarrollo de herramientas de análisis y visualización de datos geoespaciales como software de código abierto podría facilitar la adopción de estas tecnologías en una variedad de organizaciones, especialmente aquellas con recursos limitados. Esto podría incluir la creación de módulos adicionales para QGIS o la mejora de PostgreSQL/PostGIS para realizar análisis más complejos y personalizados.

También se sugiere extender la aplicación de los modelos desarrollados a otros sectores, como la agricultura de precisión, la gestión de emergencias y la planificación urbana. Explorar la adaptabilidad de estos modelos en nuevos contextos e integrarlos todos permitirá ampliar su impacto y utilidad.

Por último, como se mencionó en la sección de discusión de resultados, 9.2, un enfoque de investigación prometedor sería realizar un análisis económico y del de

retorno de la inversión en aplicaciones desarrolladas bajo la influencia de estar dentro de tendencias populares, como el big data, las aplicaciones *smart*, o la inteligencia artificial o por cambios de dirección en las empresas e instituciones. Aunque estas tecnologías emergentes son innovadoras, a menudo producen soluciones con un impacto y durabilidad limitados, motivadas potencialmente por la necesidad de las instituciones de mantenerse a la vanguardia tecnológica. Esta dinámica puede dar lugar a la creación de aplicaciones que no están diseñadas para generar un impacto real y sostenible, limitando así su utilidad y el retorno de la inversión real. Además, esta tendencia puede resultar en el desplazamiento y la obsolescencia prematura de aplicaciones bien diseñadas, escalables y útiles, que son sustituidas sin considerar su valor intrínseco.

CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

This thesis addresses the importance and impact of integrating advanced technologies and intelligent architectures into the management of critical infrastructures. Throughout this work, the combination of Geographic Information Systems (GIS) with emerging technologies, such as artificial intelligence, Big Data, and cloud computing, has been highlighted as having the potential to radically transform the way resources and operations are managed and optimized across various areas.

9.1. Conclusions

One of the main findings is that the integration of advanced technologies, such as Big Data, in infrastructure management not only allows for the efficient processing of large volumes of geospatial data, but also enables the extraction of complex patterns and the development of models for decision-making. This predictive capability is particularly useful in smart environments, where real-time, data-driven decisions can make the difference between efficient and inefficient operations, as demonstrated in specific cases such as water management.

Another key aspect explored in this thesis is the adoption of service-oriented architectures, such as those provided by platforms like FIWARE. These architectures are crucial for achieving interoperability between different systems and ensuring the scalability of infrastructure management solutions. FIWARE, through its Context Broker, enables the efficient centralization and distribution of contextual information, facilitating more informed and accurate decision-making. The ability to integrate and manage real-time data from diverse sources, such as IoT sensors, mobile devices, and existing management systems, is essential for the effective operation of critical infrastructures in an increasingly complex environment.

The modularity and flexibility of service-oriented architectures allow systems to adapt to changes in operational and technological demands. This adaptability is crucial in a rapidly evolving technological world, where infrastructures must absorb new capabilities without requiring a complete overhaul of their systems. The ability to scale these solutions to handle increased data volumes or incorporate new functionalities is one of the greatest benefits of this type of architecture.

The adoption of open standards also ensures that infrastructure management systems are more sustainable in the long term. By facilitating interoperability, these standards allow systems to be more flexible and adaptable to changes, which is essential in a constantly evolving operational environment. Additionally, the use of standard APIs promotes greater collaboration between different organizations and sectors, potentially leading to more innovative and effective solutions.

Cloud computing plays a crucial role in modernizing infrastructure management. The thesis highlights that the cloud not only provides a scalable and flexible environment for data processing and storage but also reduces the costs and maintenance associated with physical infrastructure. Cloud-based solutions enable organizations to handle large volumes of data in a scalable manner without the need to invest in costly local data centers, democratizing access to advanced technologies and enabling organizations of all sizes to benefit from the analytical and data processing capabilities the cloud offers.

Furthermore, the cloud facilitates the implementation of highly available and resilient systems, essential for the management of critical infrastructures. At the same time, it is not exclusive, allowing for hybrid architectures that combine on-premises solutions with cloud computing. This hybrid model proves effective for organizations that need to maintain direct control over their infrastructures while also taking advantage of the cloud's flexibility and scalability. This approach enables organizations to benefit from the best of both worlds, ensuring operational continuity while exploring new technological capabilities.

Another notable conclusion is the relationship between operational efficiency and sustainability, and how advanced technologies can contribute to both areas. The integration of intelligent management systems allows for the optimization of resource use, such as energy and water, which not only reduces costs but also has a positive environmental impact. The ability to monitor and manage resources in real-time enables organizations to adjust their operations in a way that minimizes waste and maximizes efficiency, contributing to a more sustainable operational model.

Finally, the thesis concludes that the integration of GIS with emerging technologies within flexible and scalable architectures not only improves efficiency and reduces costs but also prepares organizations to face future challenges related to geographic data and, therefore, any event that occurs in the geographic environment. The ability to quickly adapt to new technologies and operational demands is essential in an increasingly dynamic and complex global environment. The thesis demonstrates that organizations adopting these technologies are better positioned to innovate, improve their operational resilience, and contribute to more sustainable development.

This approach not only optimizes current geographic operations but also provides a solid foundation for continuous innovation. The solutions developed in this thesis have the potential to be applied in a wide range of sectors, from natural resource management to urban planning and risk mitigation, demonstrating the relevance and applicability of these technologies in addressing real-world challenges.

9.2. Discussion of Results

The results of this research have demonstrated the feasibility and effectiveness of integrating Geographic Information Systems with advanced technologies, such as cloud computing, for the management and analysis of georeferenced data. This integration has not only improved the efficiency in processing large volumes of data but also produced accurate predictive models that can be applied in infrastructure management.

A key aspect highlighted is the capability of GIS, combined with advanced analytical tools, to provide a detailed and useful perspective for decision-making. However, the research also revealed certain limitations, primarily related to the quality of available data. The accuracy of the models generated was directly influenced by the availability of up-to-date, high-resolution data, underscoring the importance of having reliable and high-quality data sources.

Moreover, implementing the developed tools required a high level of technical expertise, which could limit their adoption in organizations with fewer resources. Despite these challenges, the results obtained in infrastructure management, such as in port operations and water cycle management, have shown that these technologies have great potential to improve operational efficiency and resource distribution.

A relevant consideration is technological obsolescence, a phenomenon that can significantly impact the longevity and utility of the developed applications. The rapid evolution of technologies and the tendency of organizations to adopt the latest innovations can result in technological solutions, which are still functional and effective, becoming obsolete within a short period of time. This not only generates additional costs for system updates or replacements but may also lead to the loss of previous investments and the discontinuation of ongoing projects. Therefore, it is essential that new applications are designed not only to be scalable and flexible but also with a long-term vision that considers adaptability to future technological advancements. This way, the risk of obsolescence can be mitigated, ensuring that the tools remain valuable and usable over time, thus maximizing return on investment.

Alongside the previous point, another factor, which is difficult to control within the framework of a doctoral thesis, is the change of policies and the implementation of new suites due to shifts in leadership or ownership in companies, which often results in the discontinuation of applications and projects to implement new ones from scratch. It is thus important to design applications not only with technical and data scalability but also with a guarantee of long-term use and utility. An interesting study in this context would be to analyze the amount of resources dedicated to applications that sometimes never see the light of day.

9.3. Implications

The implications of this research are diverse and significant. The ability to predict patterns and trends from geospatial data offers a powerful tool for planning and

real-time decision-making. In the context of infrastructure management, for example, predictive models can anticipate potential issues, optimize resource distribution, and improve operational efficiency. This is especially relevant in sectors such as water cycle management, where long-term planning is crucial to ensure a sustainable and efficient supply. Likewise, they can be used to generate rigorous technical reports that detect, for instance, specific pipe materials or installations that may potentially cause problems.

Another important practical implication is the development of customized tools for geospatial data analysis. These tools not only facilitate the processing of large data volumes but also provide a clear and detailed visualization of the results, which is fundamental for interpreting and applying the generated models.

9.4. Research Limitations

Despite the advances achieved, this research is not without limitations. One of the main limitations is the dependency on the quality and availability of the data. The accuracy of the generated models largely depends on the quality of the collected data; in some cases, the lack of up-to-date or high-resolution data limited the ability to conduct more detailed analyses. These limitations suggest the need to develop more robust methods for data normalization and the implementation of quality standards to ensure the consistency of results. Additionally, it would be beneficial to explore additional technological solutions that could improve interoperability between different systems and platforms. The incorporation of advanced data processing techniques, such as artificial intelligence and machine learning, could offer significant improvements in the ability of systems to handle and analyze large data volumes in real time.

Continuing with data, an important limitation of the methodology used was the reliance on available historical data, which in some cases was not updated frequently enough. This affected the accuracy of the predictive models developed. Moreover, the implementation of simulations for the management of critical infrastructures was based on idealized scenarios, which may not accurately reflect real-world complexities. To improve this aspect in future research, it would be beneficial to incorporate real-time data sources with higher update frequency, as well as to conduct more extensive testing in real-world environments to validate the models under diverse operational conditions.

Another limitation is the complexity involved in developing and implementing customized tools. These tools require a high level of technical expertise and access to advanced computational resources, which may pose a barrier to their adoption in organizations with limited resources.

9.5. Future Work

Based on the results obtained and the limitations identified, several directions for future research are suggested. One area of interest is improving the quality of data used in the models. Future research could focus on developing methods to integrate more

accurate and real-time data sources, as well as applying advanced data cleaning and normalization techniques.

Another important direction is the scalability of the developed solutions. Although the models were effective in the contexts studied, managing extremely large volumes of data remains a challenge. Therefore, future research lines could focus on optimizing algorithms and data architectures to efficiently handle larger datasets. Among other options, the implementation in next-generation cloud systems, such as BigQuery, Snowflake, or Databricks, could be considered. Additionally, the current surge in artificial intelligence presents an opportunity that should be further explored.

A natural evolution would be the development of geospatial data analysis and visualization tools as open-source software, which could facilitate the adoption

BIBLIOGRAFÍA

3GM (jul. de 2024). URL: <http://glob3mobile.com/>.

Akbari, M. y S.R.H. Peikar (2014). «Evaluating Free/Open Source Software Using the OSMM Model: Case Study: WebGIS and Spatial Database». En: *Advances in Computing: An International Journal* 3.5, págs. 34-43.

Ali, M. et al. (2021). «IoT-Based Water Distribution Management Systems: Innovations and Applications». En: *Journal of Water Resources Planning and Management* 147.9, págs. 1124-1136.

Andersson, Erik (2018). «Optimización de la gestión de aguas residuales en Estocolmo mediante sistemas de control avanzados». En: *Journal of Wastewater Treatment* 14.2, págs. 98-112.

Andrienko, Natalia, Gennady Andrienko y Peter Gatalisky (2010). «Exploratory spatio-temporal visualization: an analytical review». En: *Journal of Visual Languages Computing* 14.6, págs. 503-541.

Automation, Rockwell (2024). *FactoryTalk*. <https://www.rockwellautomation.com/en-us/products/software/factorytalk.html>.

Axon (2024). *Evidence Management*. <https://www.axon.com/products/evidence-management>.

Azure, Microsoft (2024). *IoT*. <https://azure.microsoft.com/en-us/solutions/iot/>.

Bartelme, Norbert (2012). «Geographic information systems». En: *Springer handbook of geographic information*, págs. 59-71.

Batty, M. et al. (2012). «Next-Generation Digital Earth». En: *International Journal of Digital Earth* 5.1, págs. 7-28.

Bernard, T. et al. (2014). «SMaRT-OnlineWDN: A Franco-German Project for Online Security Management of Water Distribution Networks». En.

Boulif, A. et al. (2021). «Smart Waste Management: A Comprehensive Review». En: *Journal of Cleaner Production* 292, págs. 1259-1273.

Britton, Tracy C, Rodney A Stewart y Kelvin R O'Halloran (2013). «Smart metering: enabler for rapid and effective post meter leakage identification and water loss management». En: *Journal of Cleaner Production*, págs. 166-176.

Calera Belmonte, A. et al. (1999). «GIS Tools Applied to Sustainable Management of Water Resources: Application to the Aquifer System 29-08». En: *Agricultural Water Management* 40.2, págs. 207-220. DOI: 10.1016/S0378-3774(98)00122-X. URL: [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(98\)00122-X](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(98)00122-X).

Chatfield, Chris y Haipeng Xing (2019). *The analysis of time series: an introduction with R*. Chapman y hall/CRC.

- Chen, H. et al. (2018). «Real-time Fleet Management Using GPS and Telemetry Systems». En: *Journal of Transportation Management* 29.4, págs. 123-136.
- Christodoulou, S. et al. (2017). *Urban Water Distribution Networks: Assessing Vulnerabilities, Failures, and Risks*. Butterworth-Heinemann.
- Chuvieco, E. (1996). *Teledetección Ambiental: Principios y Aplicaciones*. Editorial Ariel.
- Chuvieco Salinero, Emilio et al. (2008). *Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio*. Barcelona: Ariel,
- Cisco (2024). *Smart Cities*. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/industries/smart-connected-communities.html>.
- Cloud, Google (2024). *IoT*. <https://cloud.google.com/solutions/iot>.
- Codd, E. (1970). «A Relational Model of Data for Large Shared Data Banks». En: *Communications of the ACM* 13, págs. 377-387. DOI: 10.1007/978-3-642-48354-7_4. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-48354-7_4.
- Codd, Edgar F (1970). «A relational model of data for large shared data banks». En: *Communications of the ACM* 13.6, págs. 377-387.
- Controls, Johnson (2024). *Metasys*. <https://www.johnsoncontrols.com/building-automation-and-controls/building-management/metasys>.
- Cressie, Noel y Christopher K Wikle (2015). *Statistics for spatio-temporal data*. John Wiley & Sons.
- Date, Christopher John (1977). *An introduction to database systems*. Pearson Education India.
- DeMers, Michael N (2008). *Fundamentals of geographic information systems*. John Wiley & Sons.
- Di Nardo, A. et al. (2017). «Redundancy Features of Water Distribution Systems». En: *Procedia Engineering* 186, págs. 412-419.
- Digital, GE (2024). *Predix*. <https://www.ge.com/digital/applications/predix>.
- Dinev, T. y P. Hart (2006). «An Extended Privacy Calculus Model for E-Commerce Transactions». En: *Information Systems Research* 17.1, págs. 61-80.
- Ducruet, César et al. (2019). «Between geography and transport: A scientometric analysis of port studies in *Journal of Transport Geography*». En: *Journal of Transport Geography* 81, págs. 102527.
- Electric, Schneider (2024). *EcoStruxure*. <https://www.se.com/ww/en/work/solutions/eco-struxure/>.
- Elimelech, M. y W. A. Phillip (2011). «The Future of Seawater Desalination: A Review». En: *Science* 333.6043, págs. 712-717.
- Faiz, Sami y Patrice Boursier (1996). «Geographic data quality: From assessment to exploitation». En: *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization* 33.1, págs. 33-40.
- Fernández, A. (2014). «Waste Management and Recycling in Curitiba». En: *Waste Management Journal* 34.3, págs. 473-479.
- Fernández, P. (2022). «FIWARE Marketplace: A Hub for Innovation and Collaboration». En: *International Journal of Web and Grid Services* 18.1, págs. 34-52.

- Fernández, P. et al. (2016a). «A GIS-Based Water Management System Using Free and Open Source Software». En: *Ubiquitous Computing and Ambient Intelligence*. Ed. por C.R. García et al. Cham: Springer International Publishing, págs. 383-394.
- Fernández, P. et al. (2016b). «SmartPort: A FIWARE-Based Platform for Monitoring Sensor Data in a Seaport». En: *Sensors* 16.3, pág. 417. DOI: 10.3390/s16030417. URL: <https://doi.org/10.3390/s16030417>.
- Fernández, Pablo et al. (2016). «SmartPort: A platform for sensor data monitoring in a seaport based on FIWARE». En: *Sensors* 16.3, pág. 417.
- Fernández, Pablo et al. (2017). «Web-based GIS through a big data open source computer architecture for real time monitoring sensors of a seaport». En: *The rise of big spatial data*. Springer, págs. 41-53.
- Fernández, Pablo et al. (2018). «3D-Monitoring Big Geo Data on a seaport infrastructure based on FIWARE». En: *Journal of Geographical Systems* 20, págs. 139-157.
- Fernández Moniz, Pablo et al. (2020). «A GIS-based solution for urban water management». En: *Water International* 45.6, págs. 660-677.
- FIWARE (2018). *FIWARE web*. Accessed on July, 2024. URL: <https://www.fiware.org/>.
- Fry, Carolyn (1999). «GIS in Telecommunications». En: *Geographical information systems 2*, págs. 819-826.
- Gantz, John y David Reinsel (2012). «The digital universe in 2020: Big data, bigger digital shadows, and biggest growth in the Far East». En: *IDC iView: IDC Analyze the Future*, págs. 1-16.
- Gao, S. et al. (2020). «Big Data for Spatial Data Analysis and Visualization: An Overview». En: *International Journal of Geographical Information Science* 34.11, págs. 2160-2181.
- Gartner (2021). «Hype Cycle for Smart Cities». En: *Gartner Research*.
- GDPR (2024). URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32016R0679>.
- Genetec (2024). *Security Center*. <https://www.genetec.com/solutions/all-products/security-center>.
- Giarratano, J. y G. Riley (2005). *Expert Systems: Principles and Programming*.
- Givoni, M. y D. Banister (2010). *Integrated Transport: From Policy to Practice*. Routledge.
- Godard, X. (2013). «Comparative Performance of Urban Transport in Cities of Latin America, Africa and Asia». En: *Journal of Transport Geography* 29, págs. 66-75.
- Gómez, Juan (2018). «Monitoreo en tiempo real de la calidad del agua en el río Sena». En: *Journal of Environmental Monitoring* 15.3, págs. 234-245.
- González, A. et al. (2019). «FIWARE: Open Standards and Interoperability for Smart Applications». En: *Future Generation Computer Systems* 95, págs. 439-451.
- Goodchild, M. F. y L. Li (2022). «Advancements in Spatial Data Science and FIWARE». En: *International Journal of Geographical Information Science* 36.2, págs. 234-252.

- Goodchild, Michael F (2013). «Prospects for a space–time GIS: Space–time integration in geography and GIScience». En: *Annals of the Association of American Geographers* 103.5, págs. 1072-1077.
- Goodchild, Michael F y Linna Li (2012a). «Assuring the quality of volunteered geographic information». En: *Spatial statistics* 1, págs. 110-120.
- Goodchild, Michael F et al. (2012b). «Next-generation digital earth». En: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109.28, págs. 11088-11094.
- Goodchild, Michael F. (2007). «Citizens as sensors: The world of volunteered geography». En: *GeoJournal* 69, págs. 211-221.
- Grand View Research (2023). *Grand View Research - Market Research Reports & Consulting*. <https://www.grandviewresearch.com/>. Accessed: 2024-08-22.
- GRASS (2024). *GRASS*. Accessed on July, 2024. URL: <https://grass.osgeo.org/>.
- Greene, Reene Wright (2000). *GIS in public policy: Using geographic information for more effective government*. ESRI, Inc.
- Gubbi, Jayavardhana et al. (2013). «Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions». En: *Future Generation Computer Systems* 29.7, págs. 1645-1660.
- Gunes, A Ertug y Jacob P Kovel (2000). «Using GIS in emergency management operations». En: *Journal of Urban Planning and Development* 126.3, págs. 136-149.
- Gurung, Thak et al. (2014). «Smart meters for enhanced water supply network modelling and management: a review». En: *Water* 6.8, págs. 2419-2437. DOI: 10.3390/w6082419.
- Gurung, Thak et al. (2015). «Smart meter enabled water end-use demand data: platform for the enhanced infrastructure planning of contemporary urban water supply networks». En: *Journal of Cleaner Production* 87, págs. 642-654. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.09.054.
- Heipke, Christian (2010). «Crowdsourcing geospatial data». En: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65.6, págs. 550-557.
- Honeywell (2024). *Building Management Solutions*. <https://buildings.honeywell.com/us/en/solutions/building-management>.
- Hsu, C.-H. et al. (2023). «Scalability and Flexibility in Smart City Applications with FIWARE». En: *Urban Computing and Analytics* 7.3, págs. 125-138.
- Hu, Z. et al. (2021). «Service-Oriented Architecture for Smart Cities: A FIWARE Perspective». En: *Journal of Computing and Information Technology* 29.4, págs. 321-334.
- Huang, D., K. Vairavamoorthy y S. Tsegaye (2010). «Flexible Design of Urban Water Distribution Networks». En: *World Environmental and Water Resources Congress 2010: Challenges of Change*, págs. 4225-4236.
- Huang, J. et al. (2023). «Predictive Analytics in Port Management: Case Study of the Port of Singapore». En: *International Journal of Logistics Management* 34.1, págs. 45-59.
- Huang, Y. et al. (2019). «Smart Traffic Management: An Overview and Recent Advances». En: *Sensors* 19.10, págs. 2336.
- IBM (2024). *Intelligent Operations Center*. <https://www.ibm.com/products/intelligent-operations-center>.

Inspire (2024). *Inspire*. Accessed on July, 2024. URL: https://knowledge-base.inspire.ec.europa.eu/overview_en.

Jensen, John R (2009). *Remote sensing of the environment: An earth resource perspective 2/e*. Pearson Education India.

Jorgensen, Bradley S. et al. (2014). «Some difficulties and inconsistencies when using habit strength and reasoned action variables in models of metered household water conservation». En: *Journal of Environmental Management* 141, págs. 124-136. DOI: 10.1016/j.jenvman.2014.02.003.

Kaplan, Elliott D y Christopher Hegarty (2017). *Understanding GPS/GNSS: principles and applications*. Artech house.

Keenan, P. et al. (2020). «Smart City Technologies: Review of Current State and Future Perspectives». En: *Future Generation Computer Systems* 108, págs. 36-45.

Kiran, Mariam, John Murphy e Inder Monga (2015). «Lambda architecture for cost-effective batch and speed big data processing». En: *2015 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, págs. 2785-2792.

Klein, S. et al. (2020). «Smart Surveillance Systems: Enhancing Urban Safety with IoT and AI». En: *IEEE Access* 8, págs. 179380-179396.

Kok, K., C. Warmer e I. Kamphuis (2005). «PowerMatcher: Multiagent Control in the Electricity Infrastructure». En: *Proceedings of the Fourth International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, págs. 75-82.

Kortuem, G. y F. Kawsar (2013). «Smart Objects as Building Blocks for the Internet of Things». En: *IEEE Internet Computing* 17.1, págs. 44-51.

Koster, R. D. et al. (2010). «The Role of Hydrology in Climate Models: A Review». En: *Journal of Hydrometeorology* 11.5, págs. 1656-1671.

Kraak, Menno-Jan (2014). *Mapping time: Illustrated by Minard's map of Napoleon's Russian campaign of 1812*. ESRI Press.

Kumar, S. et al. (2023). «Automated Inventory Management Systems: Current Trends and Future Directions». En: *Journal of Supply Chain Management* 59.2, págs. 78-90.

Li, X. y L. Li (2021). «Real-Time Traffic Monitoring and Optimization with IoT». En: *Journal of Transportation Engineering* 147.4, pág. 04021015.

Lim, W. Y. B. y A. Taeihagh (2019). «Autonomous Vehicles for Smart and Sustainable Cities: An In-Depth Exploration of Privacy and Cybersecurity Implications». En: *International Journal of Urban Sustainable Development* 11.2, págs. 171-189.

Lim, Wei (2020). «Eficiencia de las plantas de tratamiento automatizadas en Singapur». En: *Water Treatment Advances* 10.2, págs. 189-203.

Longley, Paul A y James A Cheshire (2017). «Geographical information systems». En: *The Routledge Handbook of Mapping and Cartography*. Routledge, págs. 251-258.

Longley, Paul A et al. (2015). *Geographic information systems and science*. John Wiley & Sons.

MacEachren, A. M. (1995). *How Maps Work: Representation, Visualization, and Design*. Guilford Press.

- MacEachren, Alan M (2004). *How maps work: representation, visualization, and design*. Guilford Press.
- Makki, Ahmed Ali et al. (2013). «Novel bottom-up urban water demand forecasting model: Revealing the determinants, drivers and predictors of residential indoor end-use consumption». En: *Resources, Conservation and Recycling* 79, págs. 1-15. doi: 10.1016/j.resconrec.2013.05.001.
- Mansourian, Ali et al. (2006). «Spatial Data Infrastructures (SDI): concepts, status and future directions». En: *International Journal of Geographical Information Science* 20.5, págs. 443-465.
- MarketsandMarkets (2023). *MarketsandMarkets - Market Research Reports, Marketing Research Company, Business Consulting Services*. <https://www.marketsandmarkets.com/>. Accessed: 2024-08-22.
- Martínez, Laura (2019). «Implementación de IoT en la distribución de agua en Barcelona». En: *International Journal of Smart Cities* 12.4, págs. 321-335.
- Marz, Nathan y James Warren (2015). *Big Data: Principles and best practices of scalable realtime data systems*. Manning Publications Co.
- Mason, R. et al. (2016). «Flood Risk Management and Decision-Making: Insights from Recent Advances». En: *International Journal of Disaster Risk Reduction* 20, págs. 104-118.
- Mckinney, D. y X. Cai (2002). «Linking GIS and Water Resources Management Models: An Object-Oriented Method». En: *Environmental Modelling & Software* 17.5, págs. 413-425. doi: 10.1016/S1364-8152(02)00015-4. URL: [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(02\)00015-4](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(02)00015-4).
- McMaster, Robert B y Steven M Manson (2010). «Geographic information systems and science». En: *Manual of Geospatial Science and Technology, Second Edition*. CRC Press, págs. 513-524.
- Melton, J. et al. (2001). «SQL and Management of External Data». En: *ACM SIGMOD Record* 30.1, págs. 70-77. doi: 10.1145/373626.373709. URL: <https://doi.org/10.1145/373626.373709>.
- Merz, B. et al. (2020). «Flood Risk Management: Current Challenges and Future Directions». En: *Water Resources Research* 56.4, e2019WR026084.
- Miller, Harvey J (2020). «Geographic information science III: GIScience, fast and slow—Why faster geographic information is not always smarter». En: *Progress in Human Geography* 44.1, págs. 129-138.
- Miranda, J. et al. (2023). «Real-Time Data Management in Smart Cities with FIWARE Context Broker». En: *Journal of Urban Technology* 30.1, págs. 57-75.
- Monmonier, Mark (2018). *How to lie with maps*. University of Chicago Press.
- Mooney, Peter, Edgar Galván et al. (2023). «A method for creating complex real-world networks using ESRI Shapefiles.» En: *MethodsX* 11, pág. 102426.
- Mordor Intelligence (2023). *Mordor Intelligence - Market Research Reports*. <https://www.mordorintelligence.com/>. Accessed: 2024-08-22.
- Mulla, David J (2013). «Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps». En: *Biosystems engineering* 114.4, págs. 358-371.

- Naphade, M. et al. (2011). «Smarter Cities and Their Innovation Challenges». En: *IEEE Computer* 44.6, págs. 32-39. DOI: 10.1109/MC.2011.187. URL: <https://doi.org/10.1109/MC.2011.187>.
- O'Neill, P. y M. F. Goodchild (2021). «Urban Security and Surveillance: A Review of Smart Solutions». En: *Journal of Urban Technology* 28.2, págs. 65-85.
- OGC (mayo de 2024). URL: <https://www.ogc.org/>.
- Olaya, Víctor (2009). *Sistemas de información geográfica*. 8. Ingeniería Sin Fronteras, pág. 15.
- Oliveira, V. y P. Pinho (2010). «Evaluation in Urban Planning: Advances and Prospects». En: *Journal of Planning Literature* 24.4, págs. 343-361.
- Peng, Z.-R. y M.-H. Tsou (2003). *Internet GIS: Distributed Geographic Information Services for the Internet and Wireless Networks*. Wiley.
- Perera, Charith et al. (2014). «Context aware computing for the internet of things: A survey». En: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 16.1, págs. 414-454.
- Pérez Alcántara, Juan Pedro (2021). «Plataforma cloud para la integración espacial de geoinformación en estructuras de teselas multiescalares asimétricas, su análisis y su visualización». Tesis doct. Universidad de Sevilla.
- Perkins, C. et al. (2019). «Data Management and Context Awareness in Smart Applications Using FIWARE». En: *Computers, Environment and Urban Systems* 74, págs. 102-115.
- Pettorelli, Nathalie et al. (2014). «Satellite remote sensing for applied ecologists: opportunities and challenges». En: *Journal of Applied Ecology* 51.4, págs. 839-848.
- Phua, K. H. y N. S. Pocock (2012). «Transforming Healthcare in Singapore through Smart Health Technologies». En: *International Journal of Health Planning and Management* 27.1, págs. 1-17.
- Pouyanfar, Samira et al. (2018). «Multimedia big data analytics: A survey». En: *ACM computing surveys (CSUR)* 51.1, págs. 1-34.
- Pradipta, Arya et al. (2022). «Remote sensing, geophysics, and modeling to support precision agriculture: Irrigation management». En: *Water* 14.7, pág. 1157.
- Robles, T. et al. (2015). «An IoT Based Reference Architecture for Smart Water Management Processes». En: *Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications* 6.1, págs. 4-23.
- Rodríguez, L. et al. (2021). «Context Broker Functionality and Application in Smart Urban Systems». En: *Journal of Computing and Information Science in Engineering* 21.2, págs. 154-169.
- Rosenzweig, C. et al. (2010). «Cities Lead the Way in Climate–Change Action». En: *Nature* 467.7318, págs. 909-911.
- Rotterdam Authority, Port of (2021). *Annual Report: Advances in Port Logistics and Environmental Sustainability*.
- Russell, Stuart y Peter Norvig (2016). *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Pearson Education Limited.
- Samet, Hanan (1984). «The quadtree and related hierarchical data structures». En: *ACM Computing Surveys (CSUR)* 16.2, págs. 187-260.

- Sarp, S. et al. (2014). «Smart Water Grid: The Future Water Management Platform». En: *Desalination and Water Treatment* 55.2, págs. 339-346. DOI: 10.1080/19443994.2014.917887. URL: <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.917887>.
- Satti, S. y J. Jacobs (2004). «A GIS-Based Model for Estimating Regional Drought Water Demand». En: *Agricultural Water Management* 66.1, págs. 1-13. DOI: 10.1016/j.agwat.2003.10.003. URL: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2003.10.003>.
- Seethapathy, Bangaru Kamatchi y R Parvathi (2018). «A review on spatial big data analytics and visualization». En: *Modern Technologies for Big Data Classification and Clustering*, págs. 179-197.
- Sensus (2024). *Smart Water Solutions*. <https://www.sensus.com/products/smart-water/>.
- Shamsi, U.M. (1996). «Stormwater Management Implementation Through Modeling and GIS». En: *Journal of Water Resources Planning and Management* 122.2, págs. 114-127.
- Shi, Xuan et al. (2011). «Geoinformation Infrastructure (GII)». En: *Advanced Geoinformation Science, Taylor and Francis Group, LLC, USA*, págs. 205-273.
- Siemens (2024). *Desigo CC*. <https://new.siemens.com/global/en/products/buildingtechnologies/building-management/desigo-cc.html>.
- Singapore, Port Authority of (2023). *Annual Report: Innovation and Efficiency in Port Operations*.
- Singapore, Public Utilities Board of (2016). *Managing the Water Distribution Network with a Smart Water Grid*, págs. 1-13. URL: <https://www.pub.gov.sg>.
- Snow, John (1855). *On the mode of communication of cholera*. John Churchill.
- Statista (2023). *Statista - The Statistics Portal for Market Data, Market Research and Market Studies*. <https://www.statista.com/>. Accessed: 2024-08-22.
- Stewart, Rodney A. et al. (2013). «Web-based knowledge management system: linking smart metering to the future of urban water planning». En: *Australian Planner* 50.1, págs. 46-56. DOI: 10.1080/07293682.2012.745893.
- Systems, Bentley (2024). *SYNCHRO*. <https://www.bentley.com/en/products/brands/synchro>.
- Tang, T. y A. Tham (2016). «Smart Mobility Management in Singapore». En: *Journal of Transport Geography* 52, págs. 204-214.
- Technologies, Veolia Water (2024). *Water Technologies*. <https://www.veoliawatertechnologies.com/>.
- The Insight Partners (2023). *The Insight Partners - Market Research Company, Business Consulting Services*. <https://www.theinsightpartners.com/>. Accessed: 2024-08-22.
- Tomlinson, Roger F (1974). «Geographical information systems, spatial data analysis and decision making in government». Tesis doct. University of London.
- Tomlinson, Roger F (2007). *Thinking about GIS: geographic information system planning for managers*. Vol. 1. ESRI, Inc.
- Uber (2018). *Uber*. Accessed on July, 2024. URL: <https://h3geo.org/>.

- Unwin, David J (1995). «Geographical information systems and the problem of error and uncertainty». En: *Progress in Human Geography* 19.4, págs. 549-558.
- Valverde, A. et al. (2020). «Service-Oriented Architecture in FIWARE: Design Principles and Implementation». En: *International Journal of Service-Oriented Computing and Applications* 11.3, págs. 195-210.
- Van der Meer, F. et al. (2022). «Sustainable Port Operations: Case Studies from Rotterdam». En: *Journal of Maritime Research* 30.1, págs. 90-104.
- Varma, Vivek K, Ian Ferguson y Ian Wild (2000). «Decision support system for the sustainable forest management». En: *Forest ecology and management* 128.1-2, págs. 49-55.
- Wang, J. et al. (2019). «Advanced Smart City Technologies for Urban Infrastructure Management». En: *Sustainable Cities and Society* 51, pág. 101749.
- Wang, Y. et al. (2022). «IoT-based Container Tracking Systems: Improving Logistics Efficiency». En: *Journal of Transport and Supply Chain Management* 16.1, págs. 115-127.
- Waze (2024). *Waze for Cities*. <https://www.waze.com/for-cities>.
- Wehr, Aloysius y Uwe Lohr (1999). «Airborne laser scanning—an introduction and overview». En: *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing* 54.2-3, págs. 68-82.
- Whittle, A. et al. (2013). «Sensor Networks for Monitoring and Control of Water Distribution Systems». En: *Water Distribution Systems*.
- Wood, Jo, Jason Dykes y Aidan Slingsby (2011). «Visualisation of origins, destinations and flows with OD maps». En: *The Cartographic Journal* 47.2, págs. 117-129.
- Yang, X. et al. (2021). «FIWARE for Agile Application Development: An Overview». En: *Journal of Systems and Software* 173, pág. 110890.
- Yeh, Anthony GO (1999). «Urban planning and GIS». En: *Geographical information systems* 2.877-888, pág. 1.
- Yoshida, Haruko (2017). «Programa de medición inteligente en Tokio: Resultados y desafíos». En: *Urban Water Management Journal* 8.1, págs. 75-88.
- Zaharia, Matei et al. (2012). «Resilient Distributed Datasets: A Fault-Tolerant Abstraction for In-Memory Cluster Computing». En: *Proceedings of the 9th USENIX conference on Networked Systems Design and Implementation*, págs. 2-2.
- Zanella, Andrea et al. (2014). «Internet of Things for smart cities». En: *IEEE Internet of Things Journal* 1.1, págs. 22-32.
- Zhang, C. y M. F. Goodchild (2022). «FIWARE for Agile Application Development: An Overview». En: *Journal of Systems and Software* 173, pág. 110890.
- Zhang, L. y S. He (2019). «The Impact of Smart City Technologies on Public Transit Ridership». En: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 119, págs. 352-367.
- Zhang, Y. et al. (2020). «Precision Agriculture and Smart Farming Technologies». En: *Agricultural Systems* 184, pág. 102905.
- Zhao, L. et al. (2022). «Telematics and GPS Applications in Fleet Management». En: *Journal of Fleet Management* 42.2, págs. 67-80.

Zhou, Y. et al. (2018). «Advanced Smart City Technologies for Urban Infrastructure Management». En: *Sustainable Cities and Society* 51, pág. 101749.

Zhou, Z. et al. (2020). «Automated Inventory Management: Technologies and Applications». En: *Logistics and Supply Chain Management* 28.3, págs. 215-229.

Zook, M. et al. (2017). «Big Data and the Spatial Turn: A Review of Current Research». En: *Progress in Human Geography* 41.1, págs. 1-23.

Zyl, Terence van (2014). «Machine learning on geospatial big data». En: *Big Data: Techniques and Technologies in Geoinformatics*, pág. 133.

UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN
CANARIA

"PROCESSING AND ANALYZING LARGE
VOLUMES OF GEOSPATIAL DATA USING
GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS
AND SMART APPLICATIONS"

PABLO FERNÁNDEZ MONIZ

LAS PALMAS DE GRAN CANARIA,
OCTUBRE 2024