

SEGURIDAD HÍDRICA



JOAQUÍN MELGAREJO MORENO
M^a INMACULADA LÓPEZ ORTIZ
PATRICIA FERNÁNDEZ ARACIL

SEGURIDAD HÍDRICA

© los autores, 2023
© de esta edición: Universitat d'Alacant
ISBN: 978-84-1302-234-5

Reservados todos los derechos. No se permite reproducir, almacenar en sistemas de recuperación de la información, ni transmitir alguna parte de esta publicación, cualquiera que sea el medio empleado -electrónico, mecánico, fotocopia, grabación, etcétera-, sin el permiso previo de los titulares de la propiedad intelectual.

TABLA DE CONTENIDO

BLOQUE I - PLANIFICACIÓN

Consideraciones ambientales con relación a la aprobación del Plan Hidrológico del Tajo de Tercer Ciclo 2022-2027 y el Trasvase Tajo-Segura José Navarro Pedreño.....	19
Planificación Hidrológica: información, participación y evaluación ambiental estratégica Ángel Ruiz de Apodaca Espinosa	39
Representación espacio-temporal del riesgo de inundación a partir de las indemnizaciones del seguro de riesgos extraordinarios Francisco Espejo Gil, Urko Elozegi Gurmendi.....	59
La desalación en la estrategia de seguridad hídrica. Implicaciones económicas y ambientales Alberto del Villar García.....	73
La desalación en la provincia de Almería: garantía para el abastecimiento y el regadío Francisco Javier Alcántara Pérez	93
Mejorar la resiliencia ante las inundaciones en la Vega Baja (España). Propuesta didáctica en bachillerato Ángela del Carmen Zaragoza, Álvaro-Francisco Morote, María Hernández Hernández.....	105
Resignificando la ciudad como biotopo humano Javier Eduardo Parada Rodríguez, Liliana Romero Guzmán, Jesús Enrique De Hoyos Martínez	117
Gestión del agua y saneamiento básico en una reserva de desarrollo sostenible: comunidad de Nossa Senhora do Livramento do Tupé, Brasil Antonio Jorge Barbosa da Silva Maria Claudia da Silva Antunes de Souza	133
Proposición de una metodología para estimar la erosión del suelo en viticultura mediante ISUM (Improved Stock Unearthing Method). Un caso en el viñedo leonés Antonio Jódar-Abellán, Marta García-Fernández, Susana García-Pisabarro, Jesús Rodrigo-Comino	141
Estimación de la disponibilidad y seguridad hídrica bajo escenarios de cambio climático en una cuenca hidrológica agro-forestal del sureste de España Antonio Jódar-Abellán, Dámaris Núñez-Gómez, Efraín Carrillo-López, Ryan T. Bailey, Pablo Melgarejo	151
Determinación del umbral de escorrentía y disponibilidad hídrica de la cuenca hidrográfica del río Jubones, Ecuador Paolo Brazales Cervantes, Seyed Babak Haji Seyed Asadollah, Antonio Jódar-Abellán.....	163
Análisis del umbral de escorrentía de la cuenca del río Obispo, en la provincia del Carchi (Ecuador) Pablo David Viera Ríos, Derdour Abdessamed, Antonio Jódar-Abellán.....	175
El acuífero del Peñón (Alicante): un pequeño acuífero kárstico Víctor Sala Sala, José Miguel Andreu Rodes, Miguel Fernández Mejuto, Ernesto García Sánchez.....	185

¿Se observan cambios en la precipitación que afecten al Acuífero del Ventós (provincia de Alicante)?

José Miguel Andreu Rodes, Igor Gómez Domenech, Miguel Fernández-Mejuto, Juan Bellot Abad197

Revisión de las políticas de modernización de regadíos en la Comunidad Valenciana. La estrategia valenciana de regadíos 2020-2040

David Sancho-Vila, Marta García-Mollá207

El impacto del proyecto europeo ARSINOE en la gestión del acuífero de la isla de El Hierro (Canarias)

Juan C. Santamarta, Noelia Cruz-Pérez, Joselin S. Rodríguez-Alcántara, Alejandro García-Gil, Miguel Á. Marazuela, Carlos Baquedano, Jesica Rodríguez Martín, Luis Fernando Martín Rodríguez 219

BLOQUE II - INFRAESTRUCTURAS

Reutilización de aguas regeneradas en la cuenca del segura. Adaptación al reglamento (UE) 2020/741: retos y oportunidades

Sonia M. Hernández López, José Carlos González Martínez231

Caracterización hidrológica de los caudales ecológicos mínimos en España

Luis Garrote de Marcos 249

Sobrevvertido en presas de hormigón. Evaluación de las acciones hidrodinámicas

Luis G. Castillo Elsitdié, José M. Carrillo Sánchez, Juan T. García Bermejo 269

Consideraciones sobre la estimación de hidrogramas de rotura de presas

Luis Altarejos García 295

La seguridad de las infraestructuras hidráulicas

Francisco Javier Flores Montoya315

La ordenación del territorio y la planificación hidrológica al servicio de la seguridad hidráulica y energética

Francisco Javier Flores Montoya325

La evolución de los servicios urbanos del agua en Madrid: un servicio de alta calidad

Ignacio Lozano Colmenarejo345

BALTEN: el agua regenerada como garantía de suministro de agua de riego en Tenerife

Ana Sánchez Espadas, Jesús Rodríguez Martí363

El sector del agua urbana frente a las nuevas exigencias legislativas para mantener la seguridad hídrica

Carmen Hernández de Vega, Alicia Ayuso Solís381

El abastecimiento de la ciudad de Ávila: retos y soluciones científico-técnicas

José Luis Molina González, Jorge Mongil Manso 399

El Consorcio de Aguas de la Marina Baja: un ejemplo de economía circular en la garantía del abastecimiento urbano ante el reto continuo de las sequías

Jaime Berenguer Ponsoda409

Gestión activa de sistemas de abastecimiento mediante el empleo de sistemas multiagente (MAS) para la sostenibilidad

Carlos Calatayud Asensi, José Vicente Berná Martínez, Vicente Javier Macián Cervera, Lucía Arnau Muñoz439

La gestión municipal del ciclo urbano del agua digitalizado

Rosa Rozas Torrente, M^a José Moya Llamas, Arturo Trapote Jaume451

Microsectorización dinámica redes de distribución de agua	
Arturo Albaladejo Ruiz.....	463
Uso de compuertas en redes de drenaje para reducir inundaciones	
Leonardo Bayas-Jiménez	477
Detección y monitoreo de aguas superficiales en la región semiárida brasileña a partir de datos orbitales de sensores remotos	
Izaias de Souza Silva.....	487

BLOQUE III - EVALUACIÓN SOCIOECONÓMICA Y JURÍDICA

La inseguridad hídrica del informe del Consejo Nacional del Agua sobre el recorte del travase Tajo-Segura	
Miguel Ángel Blanes Climent.....	499
El necesario impulso a las centrales hidroeléctricas reversibles como contribución a la seguridad energética nacional: algunas cuestiones jurídicas	
Estanislao Arana García	511
Políticas públicas para la mitigación del impacto del cambio climático sobre los aprovechamientos energéticos	
Jesús Conde Antequera	529
La legislación contra el cambio climático y la transición a una economía descarbonizada desde una doble perspectiva: ambiental y social	
José Esteve Pardo.....	549
Huella hídrica y financiación sostenible	
Domingo Zarzo Martínez, Mercedes Calzada Garzón, Patricia Terrero Rodríguez.....	559
¿Estamos sobreestimando los recursos de agua regenerada? Una ducha fría con la realidad hidro-económica	
Julio Berbel, Esther Díaz-Cano, Alfonso Expósito	577
Taxonomía de los instrumentos económicos aplicados para la gestión sostenible del agua	
Nazaret M ^a Montilla López, Esther Díaz-Cano y Julio Berbel.....	597
Seguridad hídrica y objetivos del PNIEC desde una perspectiva jurídica	
José Antonio Blanco Moa	613
SIAGES: un innovador sistema integrado de apoyo a la gestión del agua	
Alberto Esteban Barrera García, Álvaro Rodríguez García, Ramón Bella Piñeiro, Jose Pablo Ormaechea, Luis José Ruiz Aznar, Abel Solera Solera et al., Manuel Argamasilla Ruiz, Lupicino García Ortiz.....	631
Crisis energética y equilibrio económico financiero en la contratación pública	
Esteban Arimany Lamoglia	643
Garantía del abastecimiento en el Sureste español: la Mancomunidad de los Canales del Taibilla	
Patricia Fernández Aracil, M ^a Inmaculada López Ortiz, Joaquín Melgarejo Moreno.....	655
La evaluación de impacto ambiental de proyectos hidráulicos ¿lo estamos haciendo bien?	
Carlos Martín Cantarino.....	677

La seguridad energética y el autoconsumo fotovoltaico como herramienta para la seguridad hídrica	
Marcos García-López, Joaquín Melgarejo	695
Seguridad hídrica y equilibrio ecológico en el parque natural «El Hondo»: visión histórico-jurídica	
Francisco José Abellán Contreras	709
Los trasvases en tiempos de seguridad hídrica	
Paul Villegas Vega	723
Vulnerabilidad e incidencia de la pobreza hídrica en Alicante	
Ricardo Abad Coloma	735
Asequibilidad al agua urbana y pobreza hídrica en ciudades del Norte global: el caso de Alicante	
Luis E. Zapana Churata, Rubén A. Villar Navascués, María Hernández Hernández, Antonio M. Rico Amorós	745
Políticas públicas de ayudas para la mejora, modernización e innovación en el regadío de la Región de Murcia	
Ramón Martínez Medina, Encarnación Gil Meseguer, José María Gómez-Gil, José María Gómez Espín	759
O reflexo das <i>fake news</i> frente a crise ambiental: uma reflexão necessária nos dias atuais	
Aline Hoffmann, Liton Lanes Pilau Sobrinho	773
Apontamentos sobre o pagamento por serviços ambientais	
André Luiz Anrain Trentini	783
Constitucionalismo das águas – o “aguar” das constituições	
Luciana Pelisser Gottardi Trentini	795
Uso sustentável da água: uma definição a partir dos conceitos de segurança hídrica, de eficiência e de sustentabilidade	
Ana Luisa Schmidt Ramos, Alexandre Morais da Rosa	805
O regime de responsabilidade penal pela poluição hídrica no Brasil	
Jefferson Zanini, Luiz Antônio Zanini Fornerolli	815
Segurança hídrica e seu tratamento jurídico no o regime de responsabilidade penal pela poluição hídrica no Brasil e na Espanha	
Leandro Katscharowski Aguiar	827
Debatendo os ODS com base na sustentabilidade e no desenvolvimento sustentável.....	
Denise Schmitt Siqueira Garcia, Heloise Siqueira Garcia	837
A falta de efetividade no planejamento da segurança hídrica do Brasil	
Denise Schmitt Siqueira Garcia, Alexandre Waltrick Rates	851
Do constitucionalismo ao constitucionalismo global: por uma constituição mundial em defesa de bens fundamentais	
Vanessa Ramos Casagrande	863
A dessalinização da água como instrumento de segurança hídrica	
Anaxágora Alves Machado Rates	875
A canção dos oceanos	
Paola Fava Saikoski	885

Análise da lei de recursos hídricos à luz da responsabilidade do Brasil para com a sustentabilidade e a conscientização ambiental	
Adilor Danieli	895
Investigación sobre el río Amarillo en las dinastías Ming y Qing. Comentario sobre la Ley de protección del río Amarillo	
Yang Yang.....	907
Propuesta metodológica para la recolección del etnoconocimiento en la gestión del riesgo de desastre	
Isaleimi Quiguapumbo Valencia, Antonio Aledo Tur.....	919

BLOQUE IV - TECNOLOGÍAS

Nuevo sistema de riego con recuperación de agua y nutrientes	
Pablo Melgarejo, Dámaris Núñez-Gómez, Pilar Legua, Vicente Lidón, Agustín Conesa, Antonio Marhuenda, Juan José Martínez-Nicolás.....	933
Dinapsis: transformación digital para la gestión sostenible del agua y la salud ambiental	
María Tuesta San Miguel.....	953
Los contaminantes emergentes en la reforma de la directiva de aguas residuales	
Daniel Prats Rico.....	959
Fertirrigación y nuevas estrategias como garantía de seguridad hídrica en el regadío	
Alejandro Pérez Pastor y Elisa Pagán Rubio.....	985
La desalación y el hidrógeno	
Alejandro Zarzuela López.....	1005
Análisis regional de la reducción de boro en agua marina desalinizada para el riego agrícola en el sureste español	
Alberto Imbernón Mulero, José Francisco Maestre Valero, Saker Ben Abdallah, Victoriano Martínez Álvarez, Belén Gallego Elvira.....	1021
Impacto ambiental de la reducción del boro del agua de mar desalinizada para el riego en parcela	
Saker Ben Abdallah, Belén Gallego-Elvira, Alberto Imbernón-Mulero, Victoriano Martínez-Alvarez, José Francisco Maestre Valero.....	1031
Modelado cinético del consumo de CO₂ para la cepa Spirulina platensis	
Antonio F. Marcilla Gomis, Inmaculada Blasco López.....	1041
Empleo de filtro verde construido con residuos para reducir el contenido en fósforo en aguas de riego	
Teresa Rodríguez Espinosa, María Belén Almendro Candel, Ana Pérez Gimeno, Iliana Papamichael.....	1055
Tecnologías de oxidación avanzada para la degradación del fármaco carbamazepina: la ozonización	
María José Moya-Llamas, Marta Ferre Martínez, Elizabetha Domínguez Chabaliná, Arturo Trapote Jaime, Daniel Prats Rico.....	1067
Aprendizaje basado en proyectos colaborativos globales en formación profesional: banco de ensayos hidráulicos para la digitalización del agua	
Albert Canut Montalvà, Joaquín Martínez López, Maties Roma mayor, Antonio Oliva Sánchez.....	1079

Reutilización de agua para riego en la ciudad de Murcia. Proyecto LIFE CONQUER Eva Mena Gil, Simón Nevado Santos, Elena de Vicente Aguilar, Adriana Romero Lestido Benoît Fabien Claude Lefèvre.....	1091
Eliminación de microcontaminantes emergentes en lodos de depuradora mediante procesos de oxidación avanzada: peróxido de hidrógeno y ozono Clara Calvo Barahona, Adrián Rodríguez Montoya, María José Moya-Llamas, Arturo Trapote Jaume, Daniel Prats Rico.....	1103
Vigilancia y protección de las aguas superficiales mediante el proyecto WQeMS y los servicios del Copernicus Pablo Cascales de Paz, Eva Mena Gil, Isabel Hurtado Melgar, Laurent Pouget.....	1115
Tratamiento ecológico para la eutrofización y la anoxia en las masas de agua Ricardo Mateos-Aparicio Baixauli.....	1125
Modelado de descarga submarina de salmuera antes y después de la instalación de un difusor Silvano Porto Pereira, José Luís Sánchez-Lizaso, Paulo César Colonna Rosman. Ángel Loya, Iran Eduardo Lima Neto.....	1137
Las sequías en España en el siglo XXI: su influencia en la disminución y cierre de transferencias de agua del acueducto Tajo-Segura y de la conexión Negratín-Almanzora Encarnación Gil Meseguer, Ramón Martínez Medina, José María Gómez-Gil, José María Gómez Espín.....	1147

El impacto del proyecto europeo ARSINOE en la gestión del acuífero de la isla de El Hierro (Canarias)

Juan C. Santamarta

Departamento de Ingeniería Agraria y del Medio Natural,
Universidad de La Laguna (ULL), Tenerife, España

jcsanta@ull.es

<https://orcid.org/0000-0002-0269-3029>

Noelia Cruz-Pérez

Departamento de Ingeniería Agraria y del Medio Natural,
Universidad de La Laguna (ULL), Tenerife, España

ncruzper@ull.edu.es

<https://orcid.org/0000-0003-1279-0823>

Joselin S. Rodríguez-Alcántara

Departamento de Ingeniería Agraria y del Medio Natural,
Universidad de La Laguna (ULL), Tenerife, España

jrodriguez@fg.ull.es

<https://orcid.org/0000-0002-5880-9211>

Alejandro García-Gil

Instituto Geológico y Minero de España, CSIC, Madrid, España

a.garcia@igme.es

<https://orcid.org/0000-0001-5835-6390>

Miguel Á. Marazuela

Instituto Geológico y Minero de España, CSIC, Madrid, España.

ma.marazuela@igme.es

<https://orcid.org/0000-0002-3507-999X>

Carlos Baquedano

Instituto Geológico y Minero de España, CSIC, Madrid, España

c.baquedano@igme.es

<https://orcid.org/0000-0002-9522-241X>

Jesica Rodríguez Martín

Departamento de Técnicas y Proyectos en Ingeniería y Arquitectura,
Universidad de La Laguna (ULL), Tenerife, España

jrodrima@ull.edu.es

<https://orcid.org/0000-0003-4457-7760>

Luis Fernando Martín Rodríguez

Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Gran Canaria, España

luifer.martin@ulpgc.es

<https://orcid.org/0000-0003-2609-7093>

RESUMEN

La isla de El Hierro es la más pequeña y más joven del archipiélago de Canarias. En el año 2000 fue declarada Reserva de la Biosfera y, a partir del año 2014 cuenta con el proyecto denominado la Gorona del Viento, que se trata de una Central Hidroeléctrica que pretende abastecer de energía 100% renovable a toda la isla. Con respecto a la demanda hídrica de la isla, según los datos del Plan Hidrológico de la isla de El Hierro esta se cifra en 1,57 hm³/año de demanda urbana y 1,72 hm³/año de demanda por parte del sector agropecuario. Esta necesidad hídrica se cubre con las aguas subterráneas y la desalación, que aporta 1,37 hm³/año. Por lo tanto, debido a las características de la isla, ha sido seleccionada como lugar de interés para formar parte del caso de estudio de las Islas Canarias, dentro del Proyecto Europeo Arsinoe. A través de este proyecto se tratará de modelizar el acuífero y obtener un mejor conocimiento del mismo, para ser capaces de establecer valores más certeros de recarga natural, así como de proponer medidas de mejora en su manejo, al tener en cuenta escenarios futuros de cambio climático.

1. INTRODUCCIÓN

La modelización hidrogeológica de la isla de El Hierro no se había analizado en profundidad hasta ahora. Los estudios más exhaustivos de este tipo, realizados en el archipiélago canario, corresponden a las islas de Gran Canaria y Tenerife, siendo menor la disponibilidad de información acerca del acuífero en las islas no capitalinas. Los primeros estudios sobre hidrogeología en Canarias se inician al final de la década de 1950, en forma de inventarios locales.

Uno de los primeros estudios que trata en profundidad la hidrogeología de El Hierro, se publicó en 1961 por Dupuy de Lôme y Marín de la Bárcena. Los datos disponibles en este momento eran escasos, por lo que se trata fundamentalmente de una caracterización hidrogeológica general de la isla (Dupuy de Lôme, E., Marín de la Bárcena, 1961). Es a finales de la década de 1960 que se genera una comunicación sobre la hidrogeología de El Hierro en la que se mencionan los aspectos geográficos, geológicos y climáticos más representativos, vinculándose con la explotación de las aguas subterráneas y la intrusión marina, como consecuencia de la sobreexplotación en acuíferos costeros de la isla (Bravo, 1968).

En el año 1973, se publica un estudio sobre la calidad química y las características hidroquímicas de aguas subterráneas de El Hierro (Caldas & García, 1973) tanto de muestras de pozos como de nacientes repartidos por la isla, donde vuelve a detectarse contaminación por intrusión marina.

Sin embargo, los estudios hidrogeológicos más detallados comienzan a publicarse a partir de 1975, a raíz del Proyecto Estudio científico de los recursos de agua en las Islas Canarias SPA/69/515 (SPA-15, 1975).

Por su parte, en un estudio publicado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y denominado Sistemas acuíferos del Archipiélago Canario (IGME, 1992), se habla del Sistema Nº 87, “Hierro”, donde se mencionan las principales características geológicas del acuífero y los valores de producción. Se estima la recarga del acuífero en 21 hm³/año y la descarga en 8.8 hm³/año a través del mar. Se trata del estudio más completo publicado en la actualidad sobre la

hidrogeología de la isla, ya que recopila información sobre todos los estudios publicados entre 1965 y finales de los años 80, con el avance del Plan Hidrológico de 1990.

Es en el año 2011 que los hidrogeólogos Cabrera y Custodio publican una evaluación sobre la evolución de las investigaciones hidrogeológicas en Canarias desde el Proyecto SPA-15.

Llegando a la actualidad, son los Planes Hidrológicos los documentos que contienen información técnica sobre los recursos hídricos de la isla, y los que se han usado como referencia. En los trabajos de Planificación, debido a su enfoque hacia la gestión de los recursos hídricos, se estiman la asignación y la reserva de los recursos y, con respecto a la calidad del agua, se define el estado de las masas de agua a través de redes de control y se establecen los estados cuantitativo, cualitativo y químico (CIAEH, 2018).

Los últimos trabajos publicados vinculados al agua subterránea de la isla de El Hierro son trabajos científicos de carácter más específico, como los vinculados a la erupción submarina ocurrida en la isla en el año 2011 (Pérez et al., 2012), a las mediciones de gas radón en las galerías de agua (Santamarta et al., 2020), así como a la presencia de contaminantes emergentes en el Hierro (Gasco Caverro et al., 2023).

El estudio sobre el radón en galerías de agua está enfocado al análisis de la seguridad de los/as trabajadores en estos espacios, debido a la calidad del aire, habiéndose encontrado valores de entre 71 y 2980 Bq/m³ (Santamarta et al., 2020), siendo el límite fijado por la Directiva 2013/59/Euratom del Consejo, de 5 de diciembre de 2013, por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes, de 300 Bq/m³. Con respecto al estudio de los contaminantes emergentes en la isla, se observó que, a pesar de no encontrarse presencia de pesticidas en el agua subterránea, sí se encontraron concentraciones diversas de filtros ultravioleta, así como de productos farmacéuticos (Gasco Caverro et al., 2023).

Con respecto a las publicaciones más recientes en formato libro, en el año 2018 se publica El Aprovechamiento Tradicional de las Aguas Subterráneas en el que se hace referencia a la forma de obtener los recursos hídricos y la descripción científico-técnica de sus galerías y pozos de agua (Santamarta, 2018). Finalmente, en el año 2020 se publica un libro sobre hidrogeología en terrenos volcánicos (Custodio E., 2020) en el que se aborda la isla de El Hierro, haciéndose una caracterización general de su geología y sus recursos de agua subterránea en relación, fundamentalmente, a las características hidroquímicas consecuencia de la interacción con el acuífero.

2. EL PROYECTO EUROPEO H2020 ARSINOE

El proyecto ARSINOE busca vías hacia la resiliencia aunando el SIA (Enfoque de Innovación de Sistemas) y el CIW (Ventana de Innovación Climática) con el propósito de construir un ecosistema para las soluciones de adaptación al cambio climático.

La adaptación al cambio climático se refiere a todos los enfoques adoptados para ajustarse, prepararse y acomodarse a las nuevas condiciones creadas por los cambios climáticos. Para los/as gestores de recursos naturales, las estrategias de adaptación también incluyen medidas para ayudar a los recursos naturales (especies, hábitats, plantaciones forestales, cuencas hidrográficas) a acomodarse a las nuevas condiciones impuestas por el clima, pero también a hacer frente a las repercusiones socioeconómicas provocadas por la crisis de la migración climática.

Dado que el cambio climático es complejo y está interconectado con otros retos mundiales, como la seguridad alimentaria, la escasez de agua, el agotamiento de la biodiversidad y la degradación del medio ambiente, resulta insuficiente utilizar enfoques tradicionales de innovación centrados en un solo aspecto del problema. Por eso se emplea el Enfoque de Innovación de Sistemas (SIA) para abordar la creciente complejidad, interdependencia e interconexión de las sociedades y economías modernas.

En el caso de las Islas Canarias, ARSINOE se centrará en la transición ecológica y la vulnerabilidad de los acuíferos en las islas volcánicas, así como en la producción primaria, incluyendo la agricultura, la gestión del agua y las infraestructuras de energía limpia. ARSINOE tendrá en cuenta la interdependencia entre el agua y la agricultura, ya que es el sector agrícola el mayor usuario de agua en las islas. Por lo tanto, una mayor sostenibilidad dentro del sector del agua afectará positivamente al sector agrícola y a la situación hídrica y energética del archipiélago.

3. MODELO GEOLÓGICO 3D DE LA ISLA DE EL HIERRO

Uno de los objetivos del Proyecto Arsinoe es, por lo tanto, elaborar el modelo geológico e hidrogeológico en 3D de la isla de El Hierro, para mejorar en la gestión del acuífero insular y poder conocer, por vez primera, valores certeros de recarga natural. La recarga natural se verá influenciada por el cambio climático ya que, de modificarse la cantidad o la recurrencia en las precipitaciones, se afectará también la cantidad de agua infiltrada en el subsuelo y, por lo tanto, se disminuirá la cantidad de agua que se contabiliza dentro de la recarga natural (Candela et al., 2009).

Para la realización del modelo geológico 3D de la isla de El Hierro, publicado en abierto recientemente (García-Gil et al., 2023) se ha empleado el software GeoModeller, que permite la construcción de modelos geológicos complejos en 3D. Para ello utiliza datos geológicos de superficie y subsuelo y luego aplica un algoritmo geoestadístico para obtener el modelo geológico 3D.

Sin embargo, antes de emplear dicho software, se ha realizado un trabajo previo que ha consistido en la siguiente toma de datos:

- Consulta de Mapas Geológicos del Instituto Geológico y Minero de España (IGME): Distribuidos en hojas 1:50.000 (1:25.000 en los casos particulares de Canarias, Ibiza-Formentera, Menorca, Ceuta y Melilla). En los Mapas Geológicos se representa la naturaleza de los materiales (rocas y sedimentos) que aparecen en la superficie terrestre, su distribución espacial y las relaciones geométricas entre las diferentes unidades cartográficas, además de contar con algunos perfiles geológicos (Figura 1).

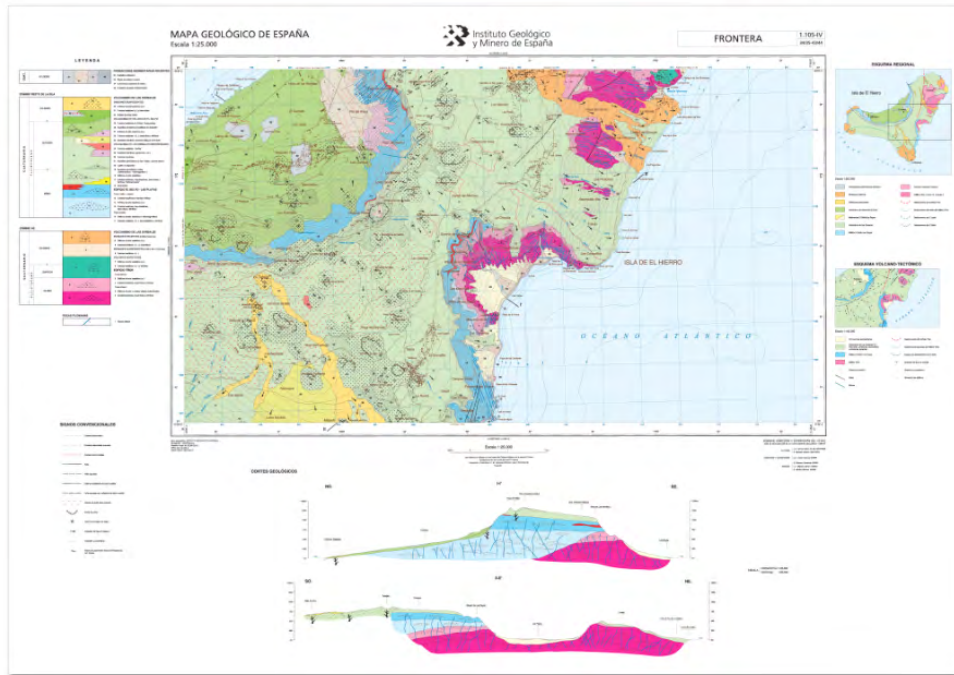


Figura 1. Mapa Geológico empleado como antecedente para la realización del modelo.
Fuente: IGME (<http://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Magna50.aspx>)

- Publicaciones científicas previas: Además de los antecedentes mencionados en la Introducción, se empleó el capítulo de libro de “La geología de El Hierro” dentro del libro “La Geología de las Islas Canarias” (Troll & Carracedo, 2016).
- Bases de Datos de los Puntos de Agua de las Islas Canarias: Se trata de una herramienta también del IGME que permite consultar los puntos con columna estratigráfica, así como la naturaleza de estos puntos y sus características (Figura 2).

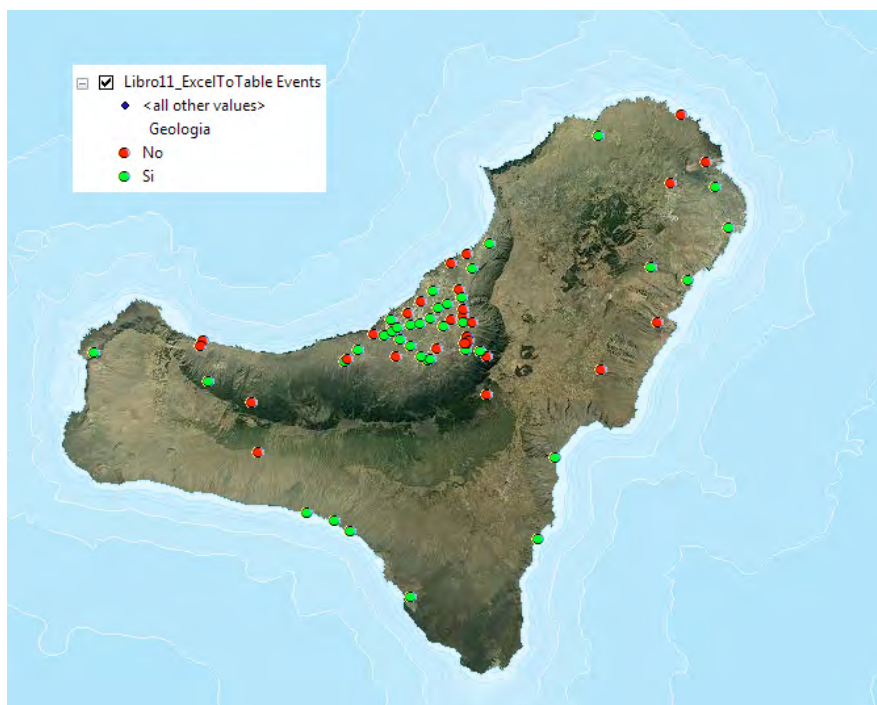


Figura 2. Obtención de 66 puntos de agua en la isla de El Hierro, de los cuales, 37 cuentan con columna estratigráfica (en verde). Fuente: IGME (<http://info.igme.es/BDAguas/>)

Los datos básicos de entrada al modelo geológico 3D son 1) Modelo digital del Terreno (MDT) de la isla, con tamaño de celda 25x25 metros (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea PNOA, IGN); 2) Georreferenciación de los Mapas Geológicos del IGME y creación de cortes geológicos, obtenidos a partir de una cartografía revisada (Figura 3); 3) Inclusión de sondeos, pozos y galerías que dispongan de columna estratigráfica de materiales.

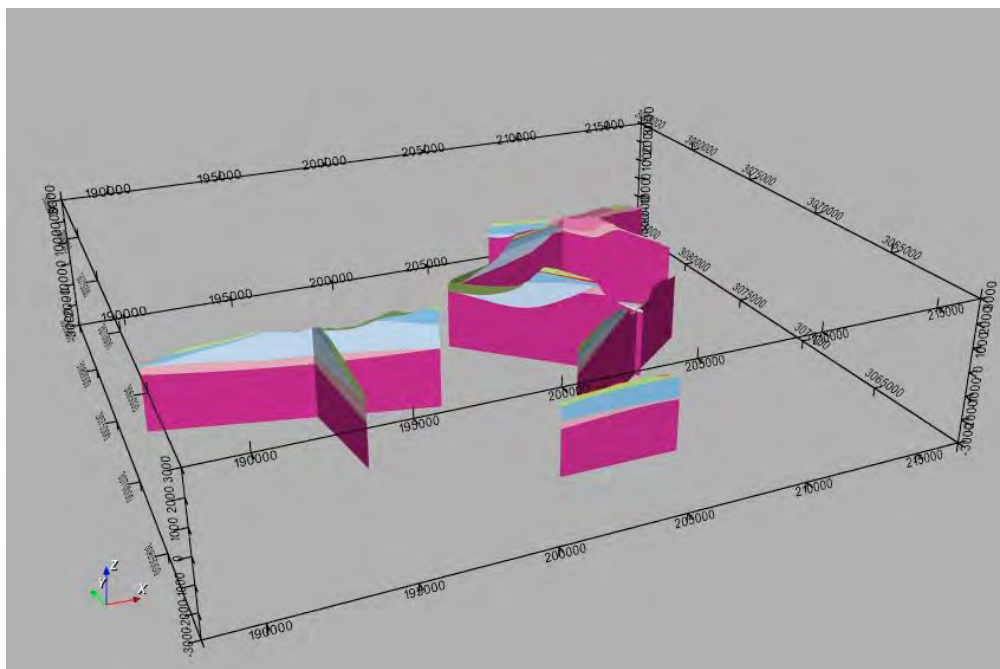


Figura 3. Creación de 7 cortes geológicos de la isla de El Hierro, recogidos en los Mapas Geológicos del IGME, utilizando el software GeoModeller.

De esta forma, unificando toda la información disponible, se obtiene finalmente el modelo geológico en 3D de la isla de El Hierro (Figura 4), en el cual se han diferenciado hasta 11 tipos de formaciones geológicas, y que servirá de base para conocer la recarga del acuífero y modelizar el mismo en diferentes escenarios futuros, haciendo uso de los escenarios propuestos por el Panel Intergubernamental de Expertos/as sobre el Cambio Climático (Amblar-Francés et al., 2017).

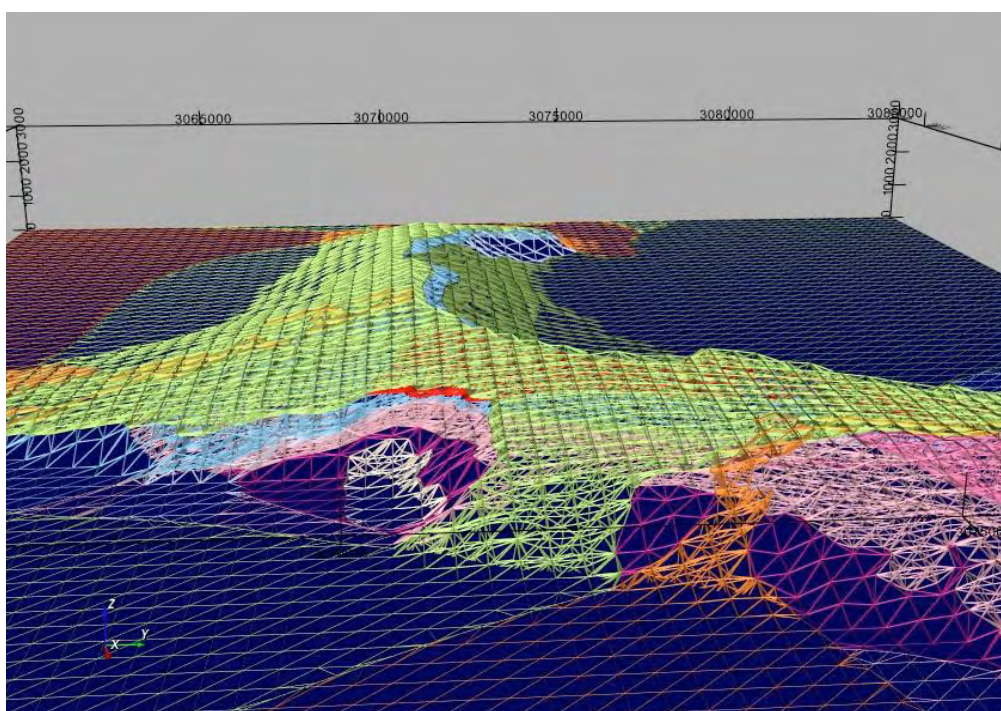
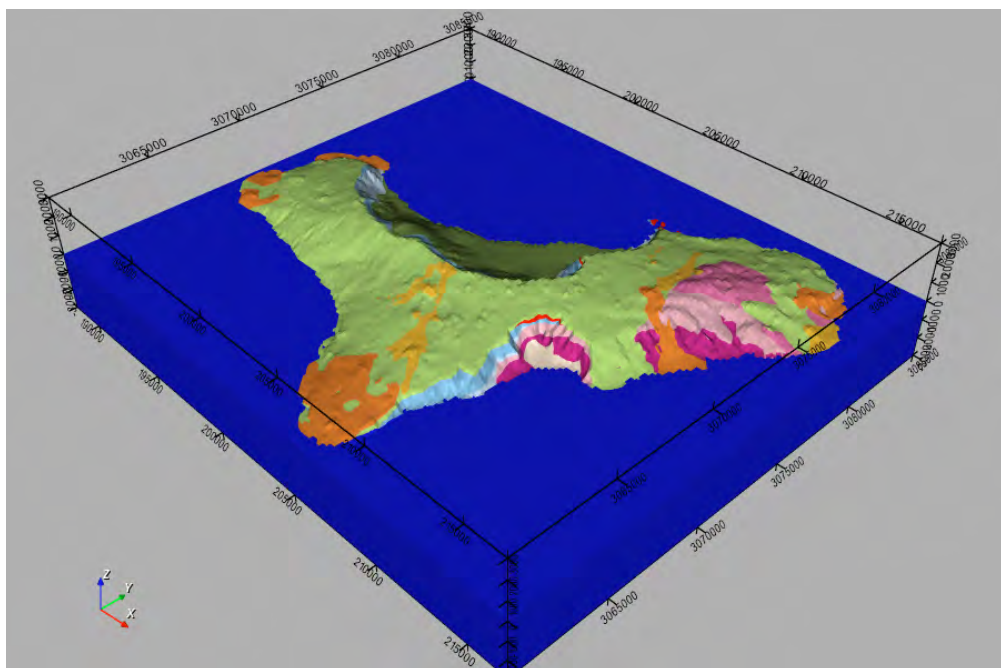


Figura 4. Modelo Geológico 3D de la isla de El Hierro, realizado con el software GeoModeller.

4. CONCLUSIONES

Es la primera vez que se ha llegado tan lejos en lo que respecta a la hidrogeología de la isla de El Hierro, al haber sido capaces de obtener un modelo geológico 3D de la isla, mediante toda la información previa existente y el uso del software *GeoModeller*. Se trata de una metodología que se puede exportar al resto de las Islas Canarias, siendo esto clave para tener un mejor conocimiento del comportamiento de los acuíferos de las islas, pudiendo implementarse toda esta nueva información en los futuros Planes Hidrológicos de las Islas, funcionando como una herramienta fundamental para establecer medidas de manejo que tengan en cuenta los escenarios futuros derivados del cambio climático.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está financiado por el proyecto ARSINOE (Climate-resilient regions through *systemic solutions and innovations*), European Union's Horizon 2020 Research and Innovation (grant agreement 101037424). La investigación expone parcialmente los resultados del proyecto SA-GE4CAN, financiado por la Agencia Estatal de Investigación (AEI PID2020-114218RA-100).

REFERENCIAS

- Amblar-Francés, P., Casado, M. J., Pastor, A., Ramos, P., & Rodríguez, E. (2017). *Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR5*. Agencia Estatal de Meteorología.
- Bravo, T. (1968). Hidrogeología de la isla de El Hierro. *Estudios Canarios: Anuario Del Instituto de Estudios Canarios*, 11, 88-90.
- Cabrera, M. C., & Custodio, E. (2011). La investigación hidrogeológica en Canarias desde el Proyecto Canarias SPA-15. *El Conocimiento de Los Recursos Hídricos En Canarias Cuatro Décadas Después Del Proyecto SPA-15 Homenaje Póstumo Al Dr. Ingeniero D. José Sáenz de Oiza*, 109–116.
- Caldas, E. F., & García, V. P. (1973). *Las aguas subterráneas de la isla del Hierro* (p. 14).
- Candela, L., von Igel, W., Javier Elorza, F., & Aronica, G. (2009). *Impact assessment of combined climate and management scenarios on groundwater resources and associated wetland* (Majorca, Spain). *Journal of Hydrology*, 376(3–4), 510-527. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.07.057>
- CIAEH. (2018). *Plan Hidrológico de El Hierro. Ciclo de Planificación Hidrológica 2015-2021* (p. 330). Consejo Insular de Aguas de El Hierro.
- Custodio E. (2020). *Hidrogeología y recursos de agua subterránea en formaciones e islas volcánicas: HIRAVOL*. Cetaqua. <http://hdl.handle.net/2117/347150>
- Dupuy de Lôme, E., & Marín de la Bárcena, A. (1961). *Estudio Hidrogeológico de la isla de Hierro (Canarias)*. Instituto Geológico y Minero de España.

- García-Gil, A., Baquedano, C., Marazuela, M. A., Martínez-León, J., Cruz-Pérez, N., Hernández-Gutiérrez, L.E., & Santamarta, J. C. (2023). *A 3D geological model of El Hierro volcanic island reflecting intraplate volcanism cycles. Groundwater for Sustainable Development*, 21. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100936>
- Gasco Caverro, S., García-Gil, A., Cruz-Pérez, N., Martín Rodríguez, L. F., Laspidou, C., Contreras-Llin, A., Quintana, G., Díaz-Cruz, S., & Santamarta, J. C. (2023). First emerging pollutants profile in groundwater of the volcanic active island of El Hierro (Canary Islands). *Science of the Total Environment*, 872, 162204. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162204>
- Instituto Geológico y Minero de España, IGME (1992). *Sistemas acuíferos de las Islas Canarias. Instituto Geológico y Minero de España.*
- Pérez, N. M., Padilla, G. D., Padrón, E., Hernández, P. A., Melin, G. V., Barrancos, J., Dionis, S., Nolasco, D., Rodríguez, F., Calvo, D., & Hernández, I. (2012). Precursory diffuse CO₂ and H₂S emission signatures of the 2011-2012 El Hierro submarine eruption, Canary Islands. *Geophysical Research Letters*, 39(16), 6-10. <https://doi.org/10.1029/2012GL052410>
- Santamarta, Juan C., Hernández-Gutiérrez, L. E., Rodríguez-Martín, J., Lario-Bascones, Rafael J., Morales-González-Moro, Á., & Cruz-Pérez, N. (2020). Radon measurements in groundwater mines in La Palma and El Hierro, Canary Islands (Spain). *Archives of Mining Sciences*, 65(4), 864-876. <https://doi.org/10.24425/ams.2020.135182>
- Santamarta, J. C. (2018). *El aprovechamiento tradicional de las aguas subterráneas en las Islas Canarias.* Fundación Caja Canarias.
- SPA-15. (1975). *Informe técnico final del Estudio Científico de los Recursos de Agua de las Islas Canarias.* SPA/69/515. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Obras Hidráulicas.
- Troll, V. R., & Carracedo, J. C. (2016). The Geology of El Hierro. In: *The Geology of the Canary Islands.* <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809663-5.00002-5>