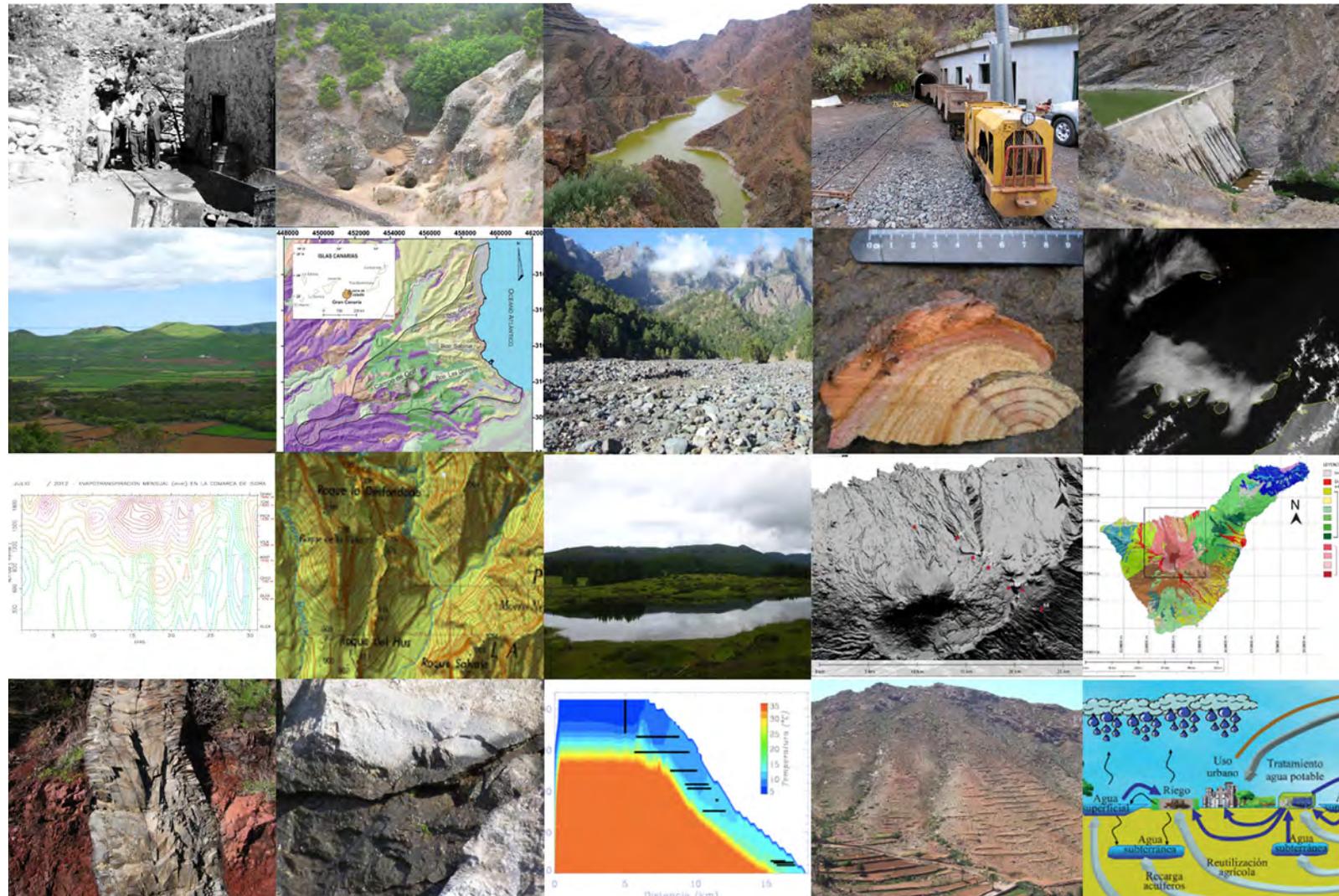


Juan Carlos Santamaría Cereza et al.

# AVANCES EN LA INVESTIGACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN ISLAS Y TERRENOS VOLCÁNICOS



# AVANCES EN LA INVESTIGACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN ISLAS Y TERRRENOS VOLCÁNICOS

**Reunión científica nacional sobre el estudio de los recursos  
hídricos en islas volcánicas**

**Dirección y Coordinación Editorial**  
Dr. Ing. Juan Carlos Santamarta Cereza



AVANCES EN LA INVESTIGACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN ISLAS Y TERRENOS VOLCÁNICOS.

*1; Estudio de los recursos hídricos subterráneos, 2; Estudio de las Obras hidráulicas y aprovechamientos superficiales, 3; Nuevas tecnologías en la producción y aprovechamiento del recurso, 4; Gestión integral del agua, hidrología forestal.*

COMITÉ CIENTÍFICO

Selección de capítulos revisados por pares ciegos

DIRECCIÓN Y COORDINACIÓN EDITORIAL

Juan Carlos Santamarta Cerezal  
jcsanta@ull.es

DISEÑO Y MAQUETACIÓN DE LA PORTADA

Alba Fuentes Porto  
albafuentesporto@hotmail.com

EDITA:

Colegio de Ingenieros de Montes  
Calle Cristóbal Bordiú, 19 28003 Madrid  
915 34 60 05

DEPÓSITO LEGAL: TF 205-2013

ISBN: 978 -84 - 616 -3860 -4

272p. ; 29 cm.

Primera Edición: Junio 2013

© Los Autores, Tenerife, 2013

**Como citar este libro;**

Santamarta Cerezal, J.C. (ed.) et al. (2013). Avances en la investigación de los recursos hídricos en islas y terrenos volcánicos. Reunión científica nacional sobre el estudio de los recursos hídricos en islas volcánicas. Universidad de La laguna. Nov 2012. Tenerife. 272 pp.

Ninguna parte de este libro puede ser reproducida o transmitida en cualquier forma o por cualquier medio, electrónico o mecánico, incluido fotografías, grabación o por cualquier sistema de almacenar información sin el permiso escrito del autor y editores.

# Contenido

<b>PRÓLOGO</b>	<b>5</b>
<b>COMITÉ CIENTÍFICO</b>	<b>7</b>
<b>PARTE 1: ESTUDIO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS</b>	<b>9</b>
ESTUDIO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA MACARONESIA. LA ISLA DE TERCEIRA EN AZORES. <i>Santamarta Cerezal, Juan Carlos; Goulart Fontes, José Carlos.</i> Pág.11	
LA INFILTRACIÓN EN LOS SUELOS DE LA ISLA DE TENERIFE. <i>Neris Tomé, Jonay; Tejedor Salguero, Marisa; Jiménez Mendoza, Carmen Concepción.</i> Pág.27	
LOS TRABAJOS DEL PROYECTO REDESAC EN EL NORTE DE GRAN CANARIA: ESTIMACIÓN DE LA RECARGA NATURAL MEDIA MEDIANTE EL BALANCE DE CLORUROS ATMOSFÉRICOS. <i>Gema Naranjo, Tatiana Cruz-Fuentes, Annetty Benavides, María del Carmen Cabrera, Pilar Hernández-Quesada, Esmeralda Estévez, Luis Fernando Martín, Emilio Custodio Gimena.</i> Pág.37	
AGUAS MINERALES NATURALES EN TERRENOS VOLCÁNICOS DEL ARCHIPIÉLAGO CANARIO. <i>Skupien Balon, Elzbieta; Poncela Poncela, Roberto; Morales González-Moro, Ángel; Lario Báscones, Rafael.</i> Pág.49	
CARACTERIZACIÓN DEL HIDROTHERMALISMO DE TENERIFE MEDIANTE EL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO. <i>Brito del Castillo, Isora; Pous Fàbregas, Jaume.</i> Pág.63	
ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA EL USO DE GALERIAS DE AGUA COMO INDICADORES DEL FLUJO GEOTERMICO EN LA ISLA DE TENERIFE. <i>Eff-Darwich Peña, Antonio Manuel; García Lorenzo, Begoña.</i> Pág.79	
<b>PARTE 2: OBRAS HIDRÁULICAS Y APROVECHAMIENTOS SUPERFICIALES</b>	<b>93</b>
EL AGUA EN LOS TERRENOS VOLCÁNICOS; FUNDAMENTO Y TECNOLOGÍAS DE APROVECHAMIENTO. <i>Santamarta Cerezal, Juan Carlos.; Rodríguez Martín, Jessica.</i> Pág.95	
PLAN DE REGADÍOS DE CANARIAS. <i>Rosa Vilar, Bernardo de la; Hernández Abreu, José Manuel; Rodrigo López, Jesús; González Hernández, José Francisco; Pérez Carballo, Antonio.</i> Pág.115	
METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA POSIBLE EXISTENCIA DE AIRE EN EL SUMINISTRO DE AGUA EN LAS ZONAS ATENDIDAS POR TEIDAGUA S.A. APLICACIÓN DE LAS MISMAS Y CONCLUSIONES. <i>Carmelo Militello Militello; Sergio Rodríguez Buenafuente; Viana L. Guadalupe Suárez; María Teresa Arencibia Pérez; Juan Carlos Guerra García.</i> Pág.129	

**PARTE 3: NUEVAS TECNOLOGÍAS, DEPURACIÓN Y CALIDAD DE AGUAS** **141**

CALIDAD DE LAS AGUAS DE RIEGO EN ZONAS VOLCÁNICAS PARA UN MANEJO INTEGRADO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS. *José Manuel Hernández-Moreno; María del Pino Palacios-Díaz*. Pág.143

NIVELES DE CONCENTRACIONES DE NITRATOS EN AGUAS DE CONSUMO HUMANO DE LA ISLA DE GRAN CANARIA. *Rodríguez Rodríguez, Inmaculada; Caballero Mesa, Jose M.; Gutiérrez Fernández, Ángel; Rubio Armendáriz, Carmen; Hardisson De la Torre, Arturo*. Pág.153

LOS HUMEDALES ARTIFICIALES COMO ALTERNATIVA ANTE LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES A PEQUEÑA ESCALA. EL CASO DE SANTA LUCÍA - GRAN CANARIA. *Vera, Luisa; Martel, Gilberto; Márquez, Miguel*. Pág.163

LOS TRABAJOS DEL PROGRAMA CONSOLIDER-TRAGUA EN GRAN CANARIA: ESTUDIO DE LA AFECCIÓN AL MEDIO POR LA REUTILIZACIÓN DE AGUAS REGENERADAS EN LA CUENCA DEL BARRANCO DE LAS GÓTERAS. *Estévez, Esmeralda; Cabrera, M<sup>a</sup> del Carmen; Palacios-Díaz, M<sup>a</sup> del Pino; Annetty Benavides; Cruz-Fuentes, Tatiana; Hernández-Quesada, M<sup>a</sup> del Pilar; Mendoza-Grimón, Vanesa; Fernández-Vera, Juan Ramón; Hernández-Moreno, José Manuel*. Pág.179

**PARTE 4: GESTIÓN INTEGRAL DEL AGUA E HIDROLOGÍA FORESTAL** **197**

ESTUDIO DE LA FRECUENCIA Y MAGNITUD DE AVENIDAS TORRENCIALES EN EL P.N. DE LA CALDERA DE TABURIENTE (LA PALMA) MEDIANTE TÉCNICAS DENDROGEOMORFOLÓGICAS. *Díez-Herrero, Andrés; Génova Fúster, Mar; Mayer Suárez, Pablo; Ballesteros Cánovas, Juan Antonio; Becerril Carretero, Laura; Rubiales Jiménez, Juan Manuel; Gutiérrez Pérez, Ignacio; Hernández Ruiz, Mario; Saiz Sánchez, Miguel Ángel; Bodoque del Pozo, José María; Ruiz Villanueva, Virginia*. Pág.199

GESTIÓN SOSTENIBLE DE LAS AGUAS REGENERADAS UTILIZANDO UN SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO SUBTERRÁNEO: CASO DE ESTUDIO PARA LA PRODUCCIÓN DE FORRAJE. *Vanesa Mendoza-Grimón; José Manuel Hernández-Moreno; Juan Ramón Fernández-Vera; María del Pino Palacios-Díaz* Pág.211

LA FRECUENCIA Y EVOLUCIÓN DEL MAR DE NUBES DURANTE EL VERANO EN LAS CUMBRES DE TENERIFE Y LOS VALLES DE LA OROTAVA Y DE GÜÍMAR. *Marzol Jaén, María Victoria*. Pág.223

ESTIMACIÓN DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL EN EL PARQUE NACIONAL DE LA CALDERA DE TABURIENTE. *Mongil Manso, Jorge*. Pág.239

ANÁLISIS CLIMÁTICO DEL INCENDIO FORESTAL DE TENERIFE COMARCAS DE ABONA E ISORA: 15 A 21 DE JULIO DE 2012. *Santana Pérez, Luis Manuel*. Pág.247

# Prólogo

Juan C. Santamarta

La islas volcánicas tienen una geología singular que condiciona enormemente la forma de aprovechar los recursos hídricos, que en general es más compleja que en los territorios continentales. El agua en las islas volcánicas es un activo fundamental para el desarrollo económico y vital de sus habitantes. Canarias es uno de los lugares del mundo donde más conocimiento se tiene sobre sus aguas subterráneas y los recursos hídricos en general, pero obviamente hay muchas cosas todavía por hacer e investigar. Los esfuerzos en investigación e ingeniería que se han realizado en las islas Canarias para disponer de unos recursos hídricos en cantidad y calidad suficientes, han sido muy importantes a lo largo de la historia. Esos avances tecnológicos pueden ser transferidos a otras regiones insulares con menor disponibilidad de recurso, de ahí que Canarias tiene una oportunidad histórica de liderar a nivel mundial la gestión y aprovechamiento de los recursos hídricos en terrenos volcánicos.

Una gestión integral del agua que contemple todos los actores participantes en el ciclo hidrológico, se hace fundamental en sistemas aislados como los archipiélagos, donde debe primar la eficiencia, por ello no sólo es necesario, captar el agua si no gestionarla de una manera sostenible.



Canarias se puede considerar como uno de los mejores laboratorios hidrogeológicos del mundo. Por una parte, en la isla coexiste un amplísimo abanico de procesos volcánicos, desde aquellos asociados a materiales muy básicos a otros asociados a materiales muy diferenciados, todo ello en un área de apenas 2.000 km<sup>2</sup>, algo insólito en una región volcánicamente activa. Por otro lado, las islas cuentan con una amplísima red de galerías subterráneas y pozos, que permiten estudiar desde el subsuelo prácticamente cualquier fenómeno geológico presente en la isla. Esta red de extracción de aguas subterráneas permite además acceder al acuífero a distintas alturas, latitudes y longitudes, hecho que también es insólito a nivel mundial. Las galerías y pozos constituyen el principal sistema de abastecimiento de agua para la población, por lo que existe un claro vínculo social y económico con el agua subterránea.

Conscientes del reto que supone el futuro de los recursos hídricos en las islas, se presenta la siguiente publicación, abierta a toda persona interesada en los procesos asociados al ciclo del agua y su aprovechamiento, en una isla volcánica.

Canarias puede liderar la investigación y el conocimiento sobre el aprovechamiento y uso del agua en las islas y terrenos volcánicos a nivel mundial.

JUAN CARLOS SANTAMARTA CEREZAL

*Doctor Ingeniero Civil en Hidráulica y Energética por la UPM*

*Ingeniero de Montes (UPM) e Ingeniero Técnico de Minas (UPM)*

jcsanta@ull.es

En San Cristóbal de La Laguna, Tenerife, Islas Canarias a 31 de enero de 2013

## Dirección y coordinación editorial

Dr. Juan Carlos Santamarta Cerezal (ULL)

## Secretaría técnica

D. Luis E. Hernández Gutiérrez (Gobierno de Canarias)

## **Comité científico**

Dra. Carmen Cabrera Santana (ULPGC)

Dr. Antonio Eff-Darwich (ULL)

Dr. Federico Aguilera Klink (ULL)

Dr. Albert Casas Ponsati (UB)

Dra. Josefina Tapias Pantebre (UB)

Dr. Juan Carlos Santamarta Cerezal (ULL y Antonio de Nebrija)

Dr. Sebastián Delgado Díaz (ULL)

Dra. Paz Arraiza Bermúdez-Cañete (UPM)

Dra. Inés Galindo (IGM)

Dra. Encarnación Rodríguez Hurtado (UPM)

D. Francisco J. Martín Castro (Consejo Insular de Aguas de La Palma)

Dr. Emilio Custodio Gimena (UPC)

Dr. Axel Ritter Rodríguez (ULL)

Dr. Arturo Hardisson de la Torre (ULL)

Dr. Jonay Neris Tomé (ULL)

Dr. Ernesto Pereda De Pablo (ULL)

Dr. José Antonio Rodríguez Losada (ULL)

Dr. Nemesio Pérez Rodríguez (ITER-INVOLCAN)

D. Luis E. Hernández Gutiérrez (Gobierno de Canarias)

D. Rafael Juan Lario Bascones (Servicio de Minas. Gobierno de Canarias)

Dr. Alfonso Méndez Cecilia (Universidad de León)

D. Jaime J. González González (Intertécnica)

D. Humberto Gutiérrez García (Gobierno de Canarias)

Dra. Elzbieta Skupien (Profesional e Investigadora)

D. Roberto Poncela Poncela (Profesional e Investigador)

Dr. Florin Ioras (Bucks New University)

D. Luis Manuel Pérez Santana (Profesional e Investigador)

D. Carlos Suárez García (Consejo Insular de Aguas de La Gomera)

D. Luis Fernando Martín Rodríguez (ULPGC y Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria)

# **PARTE 1**

## Estudio de los recursos hídricos subterráneos



## ESTUDIO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA MACARONESIA. LA ISLA DE TERCEIRA EN AZORES

Santamarta Cerezal, Juan Carlos. ETS Ingeniería Civil e Industrial. Universidad de La Laguna.  
*jcsanta@ull.es*

Goulart Fontes, José Carlos. Departamento de Ciências Agrárias da Universidade dos Açores,  
Angra do Heroísmo.  
*jfontes@uac.pt*

**RESUMEN:** La región de la Macaronesia está formada por una serie de cinco archipiélagos (Azores, Madeira, Islas Salvajes, Canarias y Cabo Verde) enclavados en el Atlántico Norte que, tienen en común, una serie de factores climáticos, geológicos y ambientales, que las hacen poseer características comunes a nivel de vegetación y recursos hídricos, principalmente, porque son de origen volcánico. Si bien hay una mayor disponibilidad de agua, creciente de Sur a Norte, con una mayor cantidad de precipitación, en las islas Azores (desde 3.000 mm/año) y menores lluvias en Cabo Verde (menos de 200 mm/año); también existe, en términos de precipitación, singularidades en cada una de las islas de los archipiélagos, también influenciada por la orografía y morfología de las islas. Terceira es una de las islas del archipiélago de Azores, en ella se pueden encontrar la mayor parte de las singularidades en la hidrología de una isla volcánica.

### 1. INTRODUCCIÓN A LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LA MACARONESIA

El problema fundamental relacionado con el agua, en esta región del planeta, se puede reducir a las siguientes cuestiones; un territorio insular y volcánico, limitado en superficie y alejado del continente que ha de abastecer a 3.100.000 habitantes, incluida su agricultura, servicios e industria. Este reto, es una tarea muy difícil y complicada técnicamente. La ingeniería y la geología han tratado de ir estudiando su solución, a través de los años y el avance de la técnica, con cierto éxito pero que en el próximo siglo la comunidad científica y los ingenieros se deberán a enfrentar a nuevos retos hidrológicos y de disponibilidad energética vinculados al agua.

Los recursos hídricos en la Macaronesia se obtienen principalmente del subsuelo; pozos, sondeos, minas y galerías de agua dulce, que son los exponentes más interesantes de este tipo de aprovechamiento, aunque no hay que obviar, que desde hace 50 años hay un auge de la producción industrial de agua sobre todo en islas con menor posibilidad de recurrir al recurso subterráneo y superficial. Los recursos hídricos superficiales, debido a la permeabilidad habitual del terreno volcánico, no son tan abundantes, salvo los aprovechados por tomaderos de barranco, con derivación a balsas impermeabilizadas de almacenamiento; aunque no hay que olvidar, que en dos islas de Canarias (Gran Canaria y Gomera) existen más de 100 grandes presas, siendo este número, la mayor densidad de embalses del mundo como ya se

ha comentado en alguna ocasión a lo largo de este libro. En general el agua almacenada por las presas, no se usa para abastecimiento urbano, sólo para agricultura. En el caso de Azores y Madeira, existen lagos que son reservas estratégicas de agua, pero su valor actualmente es ecológico y recreativo.

**Tabla 1;** Población en la Macaronesia. (Wikipedia, 2011)

SISTEMA ARCHIPIÉLAGO	HABITANTES
Azores	245.374
Madeira	247.399
Salvajes	2
Canarias	2.103.992
Cabo Verde	499.796
Total Macaronesia	3.095.729

Los problemas en relación al agua de la Macaronesia son muy similares. La mayor demanda del recurso, en general, viene dada por la agricultura, salvo en Azores, cuya demanda urbana es la mayor demandante de agua con un 56% del total disponible. Otro aspecto importante es la fracturación del territorio lo que provoca que se esté hablando de territorios divididos, con grandes diferencias en la disponibilidad del agua, por diferentes cantidades de precipitación entre las islas, incluso dentro de los propios archipiélagos (La Palma; 700 mm, Fuerteventura; 150 mm). Hay que sumar también un aumento de la población, así como del turismo masivo (Canarias, 9,6 millones de visitantes, Cabo Verde 382.000 turistas y en aumento progresivo). En este sentido, se puede concluir que; los recursos hídricos pueden ser un factor limitante a la hora de desarrollar el turismo y el desarrollo económico en la Macaronesia.

La calidad de las aguas extraídas del acuífero es otro factor importante, si las extracciones no son sostenibles (extraer más agua que la recarga natural del acuífero), como es, en muchas ocasiones, el caso de Canarias, el problema del flúor es muy destacado, así como el problema de los nitratos que comparten también Canarias y las Azores, sobre todo donde la agricultura y la ganadería es muy masiva (Azores, 100.000 cabezas de ganado vacuno). En el caso de archipiélagos, cuyos recursos subterráneos han sido agotados o bien devaluados en cuanto a la calidad del recurso hídrico, la demanda hidráulica ha sido suplida por plantas desaladoras donde en algunas ocasiones puede aparecer el problema de la presencia de boro en las aguas producidas. En general, otro problema hidroquímico es el de los bicarbonatos, en el sentido de que empeoran la calidad del agua y pueden llegar a colapsar las conducciones que la transportan.

**Tabla 2;** Estimación del turismo anual en la Macaronesia. (Santamarta JC, 2011)

Sistema archipiélago	Nº turistas estimados
Azores	300.000
Madeira	245.000
Salvajes	500
Canarias	9.600.000
Cabo Verde	385.000
Total Macaronesia	10.530.500

Otro problema en relación a los recursos hídricos, es la vinculación del agua con la energía, en los archipiélagos del Sur de la Macaronesia (Canarias, Cabo Verde), es necesario desalar el agua de mar (coste; 0.6 a 1.25 €/m<sup>3</sup>), debido a no poder satisfacer toda la demanda mediante los recursos subterráneos y superficiales, en este sentido la economía de escala es muy importante con respecto al coste del agua, a mayor dimensión (producción de m<sup>3</sup>) de la instalación, menor coste del agua desalada de mar, esto es difícil de lograr en un sistema insular, las plantas, en general son pequeñas.



**Ilustración 1 ;** Sistemas de transporte de agua en la islas de Tenerife, Canarias ( Santamarta JC, 2012)

En la mayoría de los pozos se bombea el agua, por lo tanto es necesario un suministro energético importante; en Canarias hay pozos de hasta 700 m de profundidad (por ejemplo en la zona de Vilaflor en Tenerife). Aunque en general los centros de consumo están en la costa, el agua hay que transportarla a través de una orografía abrupta y singular. Estos bombeos y transportes de agua unidos a la producción industrial del recurso, provoca una importante demanda energética, que en un archipiélago se hace más sensible que en un territorio continental, ya que las islas disponen de unos sistemas de generación eléctrica singulares.



**Ilustración 2;** Paisaje agrícola y ganadero típico de la isla de Terceira, Azores. (Santamarta JC, 2011)

Por lo general, la Macaronesia se abastece energéticamente mediante centrales eléctricas diesel, con un combustible tipo fuel oil, que es un combustible que siempre está en precios elevados, por lo tanto, el coste de producir agua es directamente proporcional al coste del petróleo; por otro lado aunque las energías renovables tienen cierta presencia en Canarias suponen un ínfimo porcentaje, la desalación de agua de mar suplida mediante esta energía, se recuerda que desalar agua de mar, por cada metro cúbico, la energía supone el 30% del total de los costes. Las perspectivas, en la Macaronesia, en este sentido son una política dinamizadora sobre las energías renovables, por ejemplo la energía geotérmica (Azores-Madeira),

hidroeléctrica e hidroeléctrica reversible (Madeira-Canarias), solar y eólica (Canarias-Azores-Cabo Verde) y buscar la eficiencia tanto energética como hidráulica.

En los costes asociados al agua en un sistema insular, como el de la Macaronesia, realmente, el usuario no paga el coste efectivo de lo que vale extraer o desalar un metro cúbico de agua incluyendo su impacto en el medio ambiente, sino que paga un precio menor que no cubre costes; el resto es asumido por los diferentes gobiernos insulares, por lo que el isleño no percibe realmente el coste del agua, aunque a favor se puede afirmar; que los insulares consumen por lo general, menos agua que los habitantes del continente, incluso en las Islas Canarias parte del agua desalada es subvencionada por el Gobierno estatal ( año 2011, 9 millones de €, 2012, 4,6 millones de €).

Las islas de la Macaronesia son vulnerables a las precipitaciones excepcionales, por lo que curiosamente, no solo la escasez de lluvias es problemática, sino que también la abundancia de agua genera graves problemas. El régimen habitual de lluvias en estas latitudes es el torrencial, (mucho precipitación en poco espacio de tiempo) esto hace que en las vías preferenciales de drenaje, los barrancos, fluya el agua de manera violenta creando avenidas con elevados caudales punta, deslizamientos en las laderas y taludes así como problemas en la población que ocupa o vive cerca de los barrancos o laderas. Este problema se acentúa tras incendios forestales, habituales en verano, en el caso de Canarias, por lo que a los materiales habituales arrastrados por las avenidas, se les suma el de las cenizas. Con respecto a los incendios recientes estudios afirman que incrementan la escorrentía y los caudales punta en un 30% incluso reducen los tiempos de retorno en 5 años. Por último en zonas donde se ha perdido la cobertura vegetal se inician procesos de erosión; otro gran problema de futuro en esta región unido a los progresivos desmantelamientos de las islas por procesos erosivos.

Otro aspecto fundamental en relación a los recursos hídricos de la Macaronesia, es la precipitación de niebla u horizontal. Esta lluvia que es potenciada y regulada por las masas forestales. Hay criterios dispares sobre su cuantificación (desde 2,5 veces la precipitación normal hasta 1,25 depende del autor que se referencie). Lo que sí es una evidencia, es que complementan el ciclo hidrológico en la Macaronesia, desde Azores hasta Cabo Verde, aunque su aprovechamiento directo es muy minoritario, limitado a casos muy particulares como; el abastecimiento de depósitos para incendios forestales, bebederos de fauna, abastecimientos de alta montaña... Como aspecto positivo, es que este fenómeno ha sido profundamente estudiado en varias islas de la Macaronesia como Madeira, Terceira, Tenerife, Gran Canaria, Hierro... e incluso se han diseñado planes de surtir agua a beberos por procedimientos mecánicos automatizados, como es el caso de la Reserva Integral de Inagua.

Por último, hay que dar importancia al turismo relacionado con el agua, casos interesantes son los senderos vinculados al agua (rutas del agua, water walks...), como es el caso en Madeira, La Palma o Tenerife (Canarias), son un recurso turístico interesante y atraen a un turismo de calidad. Una posibilidad de futuro sería el hidrogeoturismo, vincular obras hidráulicas singulares al turismo, para su visita e interpretación, por ejemplo lo que se lleva a cabo en la isla de Terceira, con la visita a tubos y cuevas volcánicas puede tener su representación en visitas a minas de agua o galerías en Canarias o Madeira.

## 2. INTRODUCCIÓN A LA ESCORRENTÍA DE LAS ISLAS AZORES

El archipiélago de las Azores está formado por nueve islas que se sitúan en el Océano Atlántico y cerca de 2.000 km de distancia de la costa occidental del continente europeo y a menos de 3.000 km del extremo más occidental oriental de América del Norte. La isla de Terceira se localiza entre los paralelos 38° 38'10" y 38°47'40" N y los meridianos 27°03'00" y 27°24'00" W. Posee una forma oval, con el eje principal orientado en la dirección E-W, con cerca de 29 km de anchura máxima y un largo máximo de 18 km, totalizando un área de 397 km<sup>2</sup>.

El archipiélago de las Azores se caracteriza por ser un ambiente volcánico de gran variabilidad geológica e hidrogeológica, donde en cada una de las islas es necesario un análisis detallado y singular del efecto de la escala, siendo fundamental para un conocimiento profundo de los sistemas hídricos de estas islas volcánicas de pequeña dimensión, con el fin de preservar la cantidad y calidad del agua.

A pesar de su importancia hidrológica, el número de estudios referentes a la escorrentía superficial en las islas Azores es escaso. Sólo destacan los trabajos desarrollados por Rodrigues (1992, 1993a, 1993b e 1995) en la isla de San Miguel, Azevedo (1998) en la isla de Flores y Azevedo et al. (2002) y Fontes (1999) en la isla de Terceira. Los estudios desarrollados por el primer autor se refieren a cursos de agua encauzados en macizos con lagos, siendo enfatizado el efecto retardante que estos cuerpos hídricos tienen en el refuerzo de los caudales específicos. Las heterogeneidades del escurrimiento anual con también evidentes de estos trabajos, especialmente las asociadas al ciclo de almacenamiento en los lagos y la impermeabilidad de los terrenos.

En el trabajo desarrollado por Azevedo (1998) se intenta cuantificar el escurrimiento superficial de los principales cursos de agua en la Isla de las Flores a partir de un conjunto de mediciones puntuales basadas en el método de la sección y velocidad. Con el fin de superar la gran escasez de datos referentes a la escorrentía en las islas volcánicas, Azevedo et al. (2002) desarrollaron una metodología genérica de resolución mensual que procura estimar las componentes de escurrimiento basadas en el valor de superávit hídrico resultante del balance hídrico climático, en la variación de la reserva de agua en el suelo y también, en la densidad de drenaje como factor de ponderación.

El principal imput a considerar en el balance hídrico de las islas Azores es la precipitación. Esta ocurre en su mayoría en forma de lluvia o, más raramente, como granizo o nieve. Su principal fuente de masas de vapor formadas a partir del océano.

## 3. HIDROGRAFÍA

El escurrimiento superficial tiene gran importancia en el archipiélago de las Azores, siendo determinada por las características climáticas, por la geomorfología, por la geología y por la edafología además de por la cobertura vegetal y las actividades antrópicas. La cartográfica

hidrográfica de la isla de Terceira, producida a partir de los datos de la Secretaría Regional de Ciencia, Tecnología y Equipamiento (SRCTE), permite identificar claramente el tipo de escurrimiento superficial que existe en esta isla (Figura 1). La mayor capacidad de drenaje se localiza en las vertientes inclinadas donde dominan los pastos permanentes, mientras que la infiltración ocurre preferencialmente en las formaciones basálticas poco alteradas, revestidas por estructuras arbustivas de la vegetación natural, constituyendo así áreas importantes de para la recarga de los acuíferos.



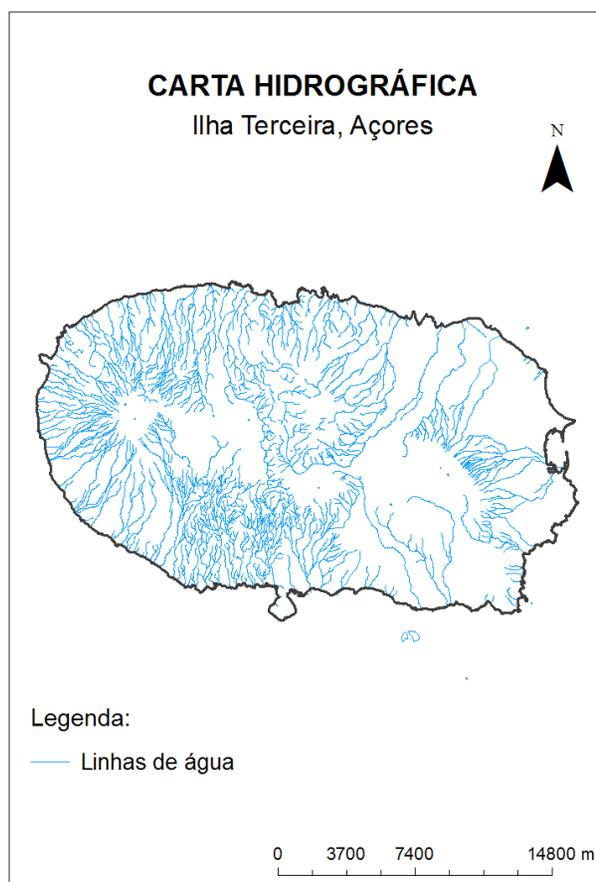
**Ilustración 3;** Lago en Terceira. (Santamarta JC, 2011)

Las formas de relieve son responsables, en gran parte, de la forma asumida por las redes hidrográficas, especialmente en este ambiente insular joven, donde la erosión todavía no ha desempeñado un papel muy preponderante en el modelado del paisaje. A medida que el escurrimiento superficial en la isla de Terceira es 509 mm por unidad de superficie, generando un volumen de 205 x 106 m<sup>3</sup>/año(PRAA, 2001).

#### 4. GEOLOGÍA

La isla de Terceira es un edificio volcánico que presenta, en relación a las otras islas de Azores, una gran diversidad litológica y estructural. Como la mayoría de los edificios insulares atlánticos, resulta de un conjunto de procesos volcano-tectónicos que incluyen dos fases distintas: una proto insular, que engloba erupciones submarinas y emergentes y otra insular resultante de la actividad eruptiva de carácter subaéreo.

Como criterio de organización espacio-temporal, se utilizó para la referencia los mismos horizontes estratigráficos considerados por Self (1974, 1976) y Self y Gunn (1976), construidos por los depósitos ignimbríticos de los Lagos y de Angra con 20.000 y 23.000 años B.P., respetivamente.



**Figura 1;** Mapa Hidrográfico de la isla de Terceira (Nunes, 2012)

En función de esos niveles, que en conjunto afloran en gran parte de la isla, las rocas y formaciones de la isla de Terceira fueron agrupadas en dos unidades: (1) una inferior, construida por las formaciones y estructuras más antiguas de estos depósitos y (2) una superior que, además de estos dos niveles de referencia, incluye los materiales y estructuras depositados después de la emisión. Las discontinuidades litológicas y los horizontes soterrados ocurren con mucha frecuencia, observándose, en estas situaciones, intensos flujos laterales. Las zonas de fractura en una colada favorecen la infiltración del agua (PRAA, 2001).

## 5. GEOMORFOLOGIA

Las cuatro principales unidades geomorfológicas de la isla de Terceira, están constituidas por los estratovolcanes de Cinco Picos, Guilherme Moniz y Santa Bárbara y también por una zona deprimida, localizada entre estos dos últimos aparatos volcánicos, designada zona de transición.

El macizo de Cinco Picos está dominado por dos grandes depresiones: la Caldera de Cinco Picos y el Graben das Lajes, intercaladas entre elevaciones alargadas que constituyen las Seras de Santiago, de Cume y de la Ribeirinha. La Formación Traquibasáltica emitida por este volcán está constituida por coladas lávicas y depósitos piroclásticos de naturaleza traquibasáltica (Rodrigues, 2002). El macizo de Guilherme Moniz está dominado por la Caldera vulcanotéctica del mismo nombre, que presenta, en el sector norte, el centro volcánico de Pico Alto. Asociada a la actividad de este volcán está el conjunto de lavas y depósitos piroclásticos de naturaleza traquítica. Al Centro Volcánico de Pico Alto están asociadas las Formaciones Ignimbríticas (Self, 1974, 1976).



**Ilustración 4;** Fumarolas en la isla de Terceira. (Santamarta JC, 2011)

Localizado en la parte occidental de la isla, el macizo de Santa Bárbara exhibe una altitud máxima de 1.201 metros. Está constituido por un gran estratovolcán de morfología cónica, truncado en su pico por una caldera de doble abatimiento. Incluye un conjunto de coladas lávicas y materiales de proyección de naturaleza basáltica (Rodríguez, 2002). Finalmente, el sistema fisural, localizado entre los macizos de Guilherme Moniz y Santa Bárbara, corresponde a un área de meseta fracturada, con coladas lávicas de naturaleza basáltica (Formación Basáltica Inferior) recientes y una serie de alineamientos de conos de escoria.

El conjunto de cúmulo-domos y domo-coladas que se pueden observar en la zona centro de la isla, están asociados a la actividad eruptiva de los volcanes de Guilherme Moniz e de Santa Bárbara (constituyendo las Formaciones peralcalinas de Pico Algo y de Santa Bárbara).

## 6. SUELOS

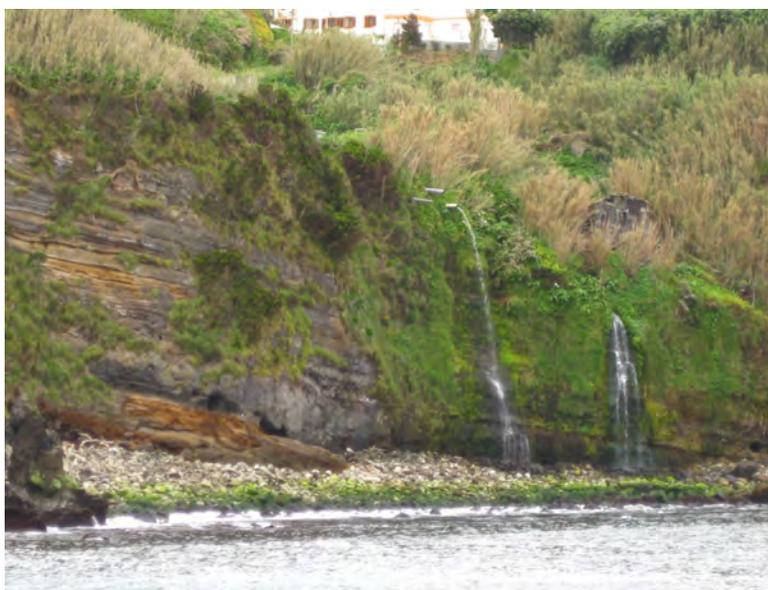
Las características edafológicas de las cuencas, que gobiernan la retención de agua y el escurrimiento subsuperficial, la infiltración y la cobertura vegetal, ejercen una gran influencia sobre el escurrimiento subsuperficial (Fontes, 1999).

El origen volcánico de las islas de Azores, asociada a las características del clima determina la aparición a gran escala de una categoría de suelos, los Andosoles. En la fracción arcilla de estos suelos existen materiales de débil ordenación estructural, especialmente alofana, imogolita, sílice opalina, ferrhidrita (Pinheiro, 1990), que les confieren propiedades muy distintas de las de otros suelos minerales, tales como una baja densidad aparente, elevada porosidad, dificultad de dispersión, elevada capacidad de retención de agua, alteración irreversible después del secado, gran poder de fijación de fosfatos, carga variable elevada asociada a elevados valores de pH en NaF y bajo contenido en bases (Pinheiro, 1990). Según Pinheiro (1990), los suelos de las Azores pueden subdividirse en tres tipos principales: Andisoles típicos (saturados e insaturados), Andosoles ferruginosos y suelos pardos. Los Andosoles típicos, saturados e insaturados, se distribuyen desde el nivel del mar hasta aproximadamente 500-600 m de altitud, en el caso de la zona en estudio. Son suelos profundos, generalmente estratificados como resultado de acumulaciones periódicas, con horizontes superficiales oscurecidos por la materia orgánica y horizontes subsuperficiales pardo-amarillos a pardo-rojizos. Presentan una textura predominantemente franca, en superficie la estructura es grumosa o granulosa, atenuándose en profundidad por la presencia de material poco alterado, en general de naturaleza ácida y más raramente basáltica (Pinheiro, 1990). En lo que respecta a sus principales características físicas podemos destacar su elevada capacidad de retención de humedad a 1500 kPa y a capacidad de campo así como su baja densidad aparente (Fontes, 1999).

La clasificación de suelos de acuerdo con el Soil Conservation Service (1972) define cuatro grupos hidrológicos de suelos, de acuerdo con su tasa de infiltración, denominados A, B, C y D. Así, los mantos lávicos recientes pertenecen al grupo hidrológico de suelos A, los Andosoles insaturados al grupo B, los suelos pardos y Andosoles ferruginosos pertenecen al grupo C y los Andosoles saturados al grupo hidrológico de suelos (SCS, 1972; Fontes, 1999).

## 7. HIDROLOGÍA DE LA ISLA DE TERCEIRA

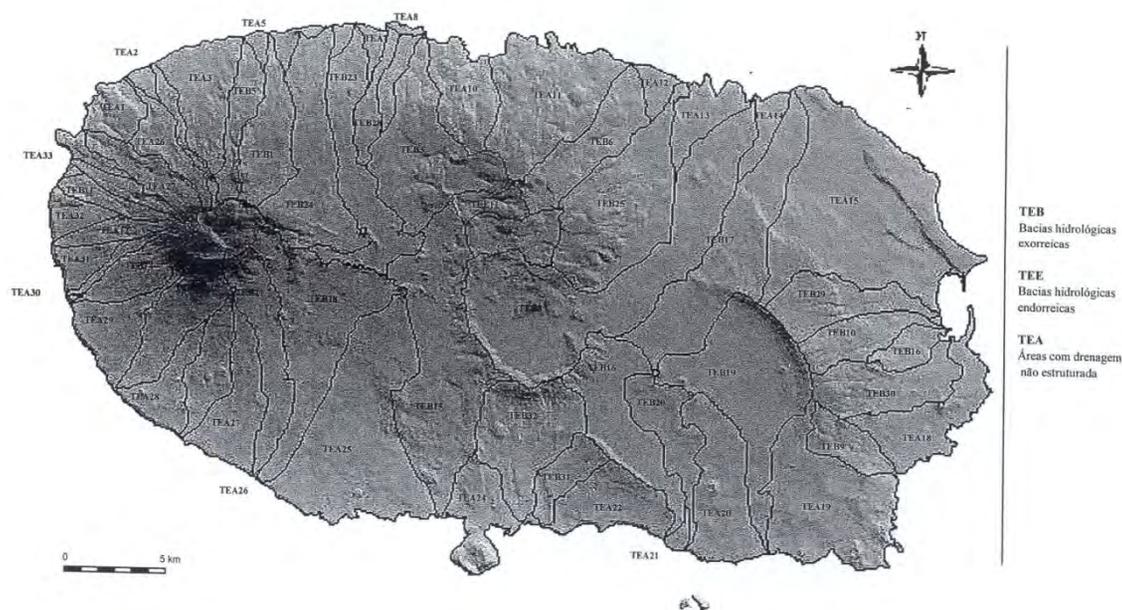
Fontes (1999) cuantificó y simuló, con el modelo OPUS (Smith, 1992), el modelo de escurrimiento superficial originado por la precipitación en la isla de Terceira sobre diferentes prácticas de uso y manejo del suelo, como base en los registros obtenidos en dos pequeñas cuencas experimentales localizadas en el macizo volcánico de los Cinco Picos. Los resultados obtenidos evidencian escurrimientos superficiales anuales reducidos que rondan el 1% de la precipitación en zonas de pasto permanente, independientemente del declive del terreno. En el caso de los periodos de renovación del pasto, caracterizados por la movilización del suelo y la ausencia de vegetación, este autor refiere valores que corresponden a 17% de la precipitación. Estas cantidades son compatibles con los escurrimientos observados en la mayor parte de las cuencas hidrográficas dispuestas en el centro y sudoeste del macizo volcánico de los Cinco Picos, donde los cursos de agua apenas funcionan en situaciones de precipitación extrema.



**Ilustración 5 ;** Desagüe al mar de dos riberas (Barrancos) en la isla de Terceira. (Santamarta JC, 2011)

### 7.1. *Cuencas hidrográficas de la isla de Terceira*

Se caracterizan sumariamente las cuencas hidrográficas de la isla de Terceira (Figura 2) con base a la cartografía elaborada por Madruga et al. (1986). Fueron individualizadas en esta isla 78 unidades hidrológicas de las cuales 44 corresponden a cuencas hidrográficas físicamente bien individualizadas y 34 a zonas agregadas a estas con escurrimiento mas estructurado. El primer grupo de estructuras ocupa, en su conjunto, cerca de 62,6% de la superficie insular, comprendiendo 33 cuencas exorreicas y 11 endorreicas. El valor medio de su superficie ronda los 5,88 km<sup>2</sup>, presentando las dispuestas en el macizo de Santa Bárbara las dimensiones menores y las encontraras en la zona de transición las mayores. Las cuencas endorreicas ocupan 1,76% del área plana de la isla, disponiéndose la mayoría en el interior de las calderas de Guilherme Moniz y de Santa Bárbara.



**Figura 2;** Cuencas hidrográficas da ilha Terceira (adaptada de Rodrigues, 2002).

Cerca de 37,4% de la superficie insular es construida por zonas donde el escurrimiento superficial no es estructurado, evidenciando infiltraciones elevadas en el terreno. En términos de unidades geomorfológicas, la zona de transición es la que presenta un área mayor de este tipo, correspondiente al 67% de su superficie.

Las cuencas hidrográficas con más de 10 km<sup>2</sup> ocupan el 40 % del área plana de la isla, disponiéndose mayoritariamente en los macizos de Guilherme Moniz e dos Cinco Picos. Las que presentan dimensiones más reducidas, con áreas planas iguales o inferiores a 5 km<sup>2</sup>, son las más comunes, alcanzando una mayor expresión en el macizo de Santa Bárbara.

### **7.2. Escorrentía superficial**

Es de esperar que el escurrimiento superficial presente una variabilidad superior a la precipitación, provocada por los efectos del retraso inherente a la hidrología, que hacen coincidir las lluvias de fin de invierno con los valores de caudal significativos resultantes del drenaje de acuíferos (PRAA, 2001).

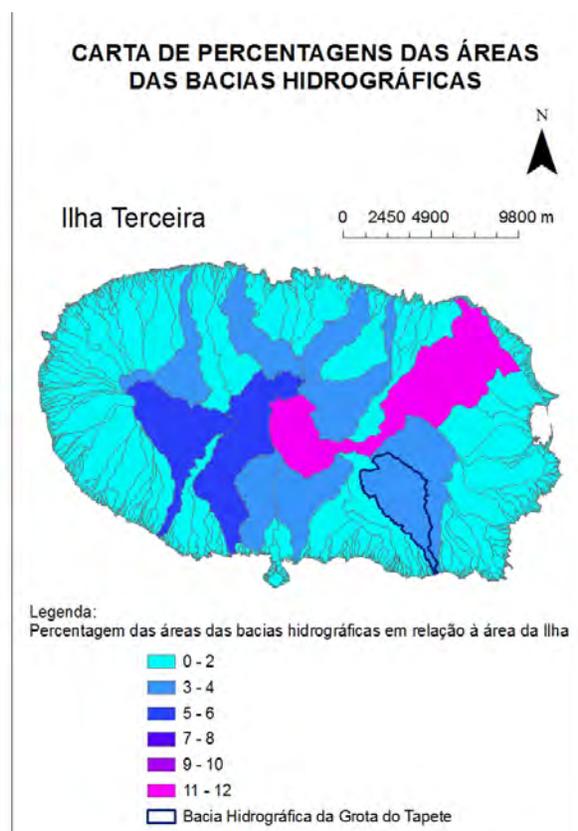
### **7.3. Recarga del acuífero**

En las Azores son generados de media anualmente 690 mm de escorrentía superficial y 150 mm de recarga de los acuíferos (PRAA, 2001). En la isla de Terceira, las tasas de recarga en relación a la pluviometría varían entre 16 y 49% aproximadamente (PRAA, 2001). Aunque se reconoce que la precipitación de las islas Azores son favorables a una recarga regular del

acuífero, el hecho es que, dada la exigüidad territorial y la estructura geológica general de las islas, la recarga no puede ser entendida como reserva disponible (PRAA, 2001).

El rápido y permanente descenso de los niveles freáticos deriva de varios factores tales como (PRAA, 2001):

- La descarga subterránea natural, relacionada con los caudales extraídos a través de pozos de captación, verificándose frecuentemente fenómenos de sobreexplotación de acuíferos.
- Las descargas laterales de los acuíferos a través de discontinuidades típicas de ambientes volcánicos, que no fueran contabilizadas en el cálculo de reserva de agua.
- Condiciones de cercanía con el mar, que comprometen tanto la cantidad como la calidad del agua almacenada, particularmente, fenómenos de intrusión salina. La descarga subterránea junto a la línea de costa o submarina no es igualmente muy considerada, por la imposibilidad de ser estimada.
- Así, las reservas de agua dulce tienen un tiempo de residencia corto, comparado con la generalidad de las condiciones continentales.



**Figura 3;** Mapa de cuencas hidrográficas de la isla de Terceira (Nunes)

Según el Plan Regional de Agua (PRAA, 2001), citado por la situación mencionada de falta o ausencia de datos, la estimación de las reservas de agua de los acuíferos se encuentra sobrestimada, estando asociada a una significativa margen de error. Paralelamente a esta cuestión, existe el hecho de no conocer con rigor el volumen de agua presente en el subsuelo que puede ser captada. En efecto, la localización y características geométricas e hidrodinámicas pueden incluso desaconsejar su exploración. Parece por lo tanto, una necesidad distinguir la disponibilidad de agua de entre la totalidad de reserva y, establecer con seguridad un intervalo de valores que corresponda a una más correcta aproximación de la realidad. En este contexto, se opta por considerar, para todos los acuíferos, un intervalo de entre 10 y 20% del valor inicial estimado para las reservas acuíferas (PRAA, 2001). Este valor constituye la disponibilidad subterránea y, según el Plan hidrológico referido, deberá ser considerado como límite máximo de agua disponible en el acuífero.

#### REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- Azevedo, E.M.B.; Rodrigues, A.P.C.; Diogo, P.A.; Rodrigues, M.C.S.M., (2002). *Infiltração e escoamento em pequenas ilhas vulcânicas. Aproximação genérica à quantificação da infiltração e do escoamento nas ilhas dos Açores*. Comunicações do VI Congresso da Água.
- Azevedo, J.M.M., (1998). *Geologia e Hidrogeologia da Ilha das Flores (Açores – Portugal)*. Tese de Doutoramento. Departamento de Ciências da Terra. Universidade de Coimbra.
- Fontes, J.C., (1999). *Comportamento hidrológico dos solos agrícolas da Terceira: avaliação e simulação com o modelo OPUS*. Dissertação de doutoramento, Departamento de Ciências Agrárias, Universidade dos Açores, Angra do Heroísmo.
- Madruça, J.S., Meneses, J.G.A.; Azevedo, E.M.B, (1986). *Delimitação das bacias hidrográficas da ilha Terceira*. Universidade dos Açores, Departamento de Ciências Agrárias. Angra do Heroísmo.
- Nunes, S.J.O. (2012). *Modelação hidrológica distribuída em regiões insulares vulcânicas. Aplicação à bacia hidrográfica da grota do tapete, ilha Terceira, Açores*. Dissertação apresentada à Universidade dos Açores para o efeito de obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, Departamento de Ciências Agrárias da Universidade dos Açores, Angra do Heroísmo.
- P.R.A.A. (Plano Regional da Água dos Açores), (2001). Direção Regional do Ordenamento do Território e dos Recursos Hídricos / Secretaria Regional do Ambiente, Instituto da Água.
- Pinheiro, J.A., (1990). *Caracterização dos solos da ilha Terceira*. Tese de Doutoramento. Departamento de Ciências Agrárias, Universidade dos Açores.
- Rodrigues, F. C., (2002). *Hidrogeologia da Ilha Terceira (Açores, Portugal)*. Dissertação apresentada à Universidade dos Açores para o efeito de obtenção do Grau de Doutor no Ramo de Engenharia do Ambiente, especialidade Engenharia do Ambiente. Departamento de Ciências Agrárias da Universidade dos Açores, Angra do Heroísmo.
- Rodrigues, R., (1992). *Avaliação das disponibilidades hídricas da ilha de S. Miguel Açores*. Rel. 217/92 - NHHF, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Rodrigues, R., (1993a). *Plano para a gestão de recursos hídricos na ilha de S. Miguel (Açores)*. Rel. 21/93 - NHHF, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Rodrigues, R., (1993b). *Condensação da água de neblinas como incremento da precipitação – relato de experiências prévias*. Rel. 113/93-NHHF, LNEC.
- Rodrigues, R., (1995). *Hidrologia de Ilhas Vulcânicas*. Tese para a obtenção do grau de especialista. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

- Santamarta Cerezal, J.C.; Hernández Gutiérrez LE. (2012); Minería del agua y recursos hídricos en islas y terrenos volcánicos. Documental audiovisual. Universidad de La laguna.
- Santamarta Cerezal, J.C. Et al.(2012); Hidrología y recursos hídricos en islas y terrenos volcánicos. Colegio de Ingenieros de Montes en Canarias. Inédito. Tenerife.
- Santamarta Cerezal, J.C. (2011); *El agua en Canarias. Historia ,ciencia y tecnología*. Boletín de la Real Sociedad Económica de Amigos del País de Tenerife, nº 9 , 4ª Época.
- Soil Conservation Services (SCS), (1972). *Estimation Of Direct Runoff from storm rainfall*. National Engineering Handbook, Chapter 10, US-Government Printing Office, Washington, D.C..
- Self, S., (1974). *Recent volcanism on Terceira, Azores*. PhD thesis. London University, Imperial College.
- Self, S., (1976). *The recent volcanology of Terceira, Azores*. Jl. Geol. Soc. London.
- Self, S. e GUNN, B.M., (1976). *Petrology, volume and age relations of alkaline and saturated peralkaline volcanics from Terceira, Azores*. Contrib. Mineral. Petrol. 54.
- Smith, R. E., (1992). *Opus: An integrated simulation model for transport of nonpoint-sources pollutants at the field scale*. Volume I, documentation. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-98.



## LA INFILTRACIÓN EN LOS SUELOS DE LA ISLA DE TENERIFE

Neiris Tomé, Jonay. Dpto. de Edafología y Geología, Facultad de Biología, Universidad de La Laguna .  
*jneris@edu.ull.es*

Tejedor Salguero, Marisa. Dpto. de Edafología y Geología, Facultad de Biología , Universidad de La Laguna. España. *martesa@ull.es*

Jiménez Mendoza, Carmen Concepción. Dpto. de Edafología y Geología, Facultad de Biología , Universidad de La Laguna. España. *cacojime@ull.es*

**RESUMEN:** La tasa de infiltración del agua en el suelo es una propiedad fundamental que interviene en aspectos tan variados como la disponibilidad de agua para las plantas, la recarga de los acuíferos, los procesos de erosión hídrica, la ocurrencia de avenidas y el modelado del territorio. En este sentido, se ven afectados por ella tanto elementos naturales del medio como otros de índole humana como son los relacionados con la agronomía o la ordenación del territorio. Los planeamientos y elaboración de modelos hidrológicos integrales no pueden obviar la importancia del recurso suelo como medio regulador de la infiltración. Los estudios realizados en la isla de Tenerife en los últimos años corroboran este extremo y remarcan la gran dependencia de esta propiedad hacia la tipología y propiedades del suelo, así como con su uso, manejo y vegetación.

### 1. INTRODUCCIÓN

En el archipiélago canario, el agua es un recurso de extraordinario valor y de difícil disponibilidad en algunas islas, donde la sobreexplotación de los acuíferos y la reducción de su calidad han llevado a la implantación de tecnologías y procesos de desalación y depuración. En la isla de Tenerife el 89% del agua procede de fuentes convencionales, correspondiendo el 87% del total extraída a recursos subterráneos (principalmente galerías y pozos) y el 2% a recursos superficiales y manantiales (Consejo Insular de Aguas de Tenerife, 2004). Por este motivo, es de gran interés profundizar en el conocimiento del ciclo hidrológico en general, y del proceso de infiltración del agua en el suelo en particular.

La infiltración se define como la entrada del agua a través de la capa superficial de la corteza terrestre, es decir del suelo. La relación entre el aporte de agua (lluvia, riego, etc.) y la infiltración determina la proporción de la primera que penetra y puede moverse hacia estratos profundos, y la que queda en superficie disponible para la escorrentía. Propiedades edáficas como la porosidad, estructura, textura, etc., son de especial relevancia en este proceso. La naturaleza volcánica de las Islas Canarias contribuye, entre otros factores, a la formación de algunos suelos con propiedades muy peculiares en cuanto a su mineralogía, que se traduce en

un comportamiento característico ante la infiltración. Su conocimiento es por tanto fundamental para la planificación de un recurso tan escaso en las islas como es el agua.

En este trabajo se presentan los resultados de la caracterización de la infiltración en los suelos de la isla de Tenerife.

## **2. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA INFILTRACIÓN DEL AGUA EN EL SUELO**

En el proceso de infiltración influyen tanto las características del suelo como de la lluvia, además de otros factores externos capaces de modificarlas.

El suelo es un sistema trifásico (fases sólida, líquida y gaseosa) en el que la fase sólida está formada por partículas elementales que se agregan constituyendo una estructura porosa tridimensional en la que pueden penetrar tanto el aire como el agua (Hillel D, 1980). El volumen, pero también la distribución y continuidad de los poros del suelo, determinan en última instancia la capacidad de infiltración del mismo puesto que son el medio a través del cual se mueve el agua. La conformación de la porosidad del suelo está dominada por propiedades como la textura (el comportamiento del suelo resultante de la cantidad y actividad de sus distintas fracciones granulométricas), el desarrollo de la estructura (la forma y fuerza con que las partículas sólidas se ordenan) o la mineralogía del suelo. En general, las texturas finas favorecen la formación de estructuras más compactas y menos porosas, disminuyendo la conductividad hidráulica y la velocidad de infiltración. Además, esta propiedad también tiene influencia sobre la estabilidad estructural del suelo. Desde el punto de vista de la estructura, los suelos con menor estabilidad tienden a formar estructuras compactas que presentan menor porosidad y, por lo tanto, menor velocidad de infiltración que los suelos de estructura más estable. La mineralogía de las arcillas participa igualmente en la formación de la estructura dado que determina su susceptibilidad a la ruptura de los agregados. Además, algunas arcillas presentan capacidad de hinchamiento al aumentar la humedad del suelo. Esto se traduce en la disminución de su porosidad y, como consecuencia, en una reducción de la infiltración (Ben-Hur M *et al.*, 1998). Los productos de ordenación de corto alcance (POCA) típicos de algunos suelos volcánicos (Andisoles) facilitan la formación y estabilización de la estructura porosa (Nanzyo M, Shoji S, Dahlgren R, 1993). El mismo papel estabilizador de la estructura del suelo ha sido atribuido tradicionalmente a la materia orgánica (Porta J, López-Acevedo M, Roquero C, 2003), que se comporta como agente cementante entre las partículas del suelo (Emerson WW, 1977). Otras propiedades edáficas como la repelencia al agua tienen especial importancia en la resistencia del suelo al humedecimiento. Su presencia en los horizontes superficiales del suelo puede por ello suponer una disminución de la infiltración (Doerr SH, Shakesby RA, Walsh RPD, 2000).

Las características de la lluvia afectan también al proceso de infiltración. En este sentido destacan la intensidad, el tamaño y la velocidad de las gotas de lluvia que determinan su energía cinética y su capacidad para destruir la estructura del suelo.

Por último, dentro de los factores ambientales que afectan a la infiltración es imprescindible señalar: i) la pendiente, que mantiene una relación negativa con la infiltración, ii) la cobertura vegetal, que tiene un efecto positivo sobre la infiltración o iii) el uso del suelo, que puede afectar a muchas de las propiedades edáficas antes mencionadas y que están relacionadas con la infiltración del agua en el suelo.

### 3. CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS DE LA ISLA DE TENERIFE

Se han descrito 6 órdenes de suelos en la isla Tenerife utilizando como sistema de clasificación la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999).

Los **Andisoles** son los suelos más típicos de las regiones volcánicas. Su composición mineralógica es consecuencia de la naturaleza volcánica del material de origen. Son suelos ricos en productos de ordenación de corto alcance (Andisoles alofánicos), complejos organominerales (Andisoles no alofánicos) y vidrio volcánico (Andisoles vítricos). Los Andisoles alofánicos más típicos están principalmente asociados a zonas húmedas, en la franja de condensación del alisio y sus proximidades, sobre materiales recientes. Los Andisoles organominerales se han identificado también en la zona más húmeda pero sobre materiales más antiguos. Los Andisoles vítricos tienen una distribución amplia al estar asociados a materiales con mucha menor alteración que los anteriores.

Los **Vertisoles** son suelos arcillosos con una mineralogía dominada por arcillas hinchables capaces de expandirse y contraerse en función del contenido de humedad del suelo. Se localizan en ambas vertientes de la isla sobre materiales antiguos y frecuentemente tienen carácter coluvial.

Los **Aridisoles** son suelos asociados a condiciones áridas. Destaca la fragilidad de su superficie consecuencia de la inestabilidad de sus agregados. Ocupan una importante superficie en la vertiente meridional de la isla, alcanzado altitudes muy variadas dependiendo de la orientación. En la vertiente norte su representación está muy limitada, con sólo algunos núcleos en la franja costera.

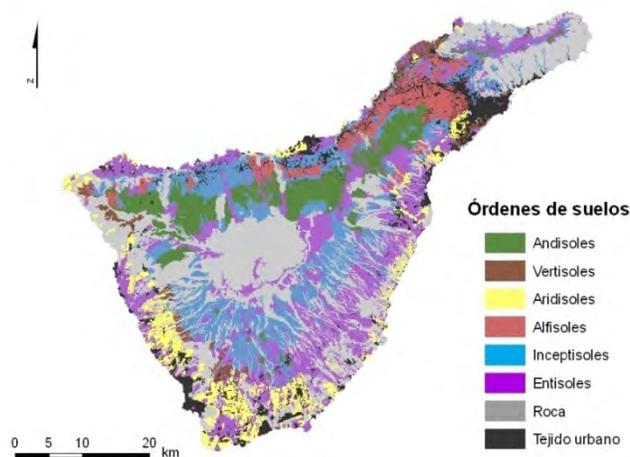
Los **Alfisolos** son suelos que presentan un horizonte de acumulación de arcillas (horizonte argílico). Se sitúan en la zona de medianías de la vertiente norte, en la cota superior a los Vertisoles.

El orden **Inceptisol** es muy heterogéneo e incluye suelos muy variados. Sus propiedades edáficas varían ampliamente de un suelo a otro dependiendo de la tipología a la que estén cercanos (ándicos, vétricos, etc.). Se encuentran muy repartidos en diferentes niveles altitudinales, a excepción de la franja costera.

El orden **Entisol** incluye suelos con escaso o ningún desarrollo de horizontes edáficos, pero que permiten su colonización por ciertas especies vegetales. Su ubicación es variada, encon-

trándose bajo todas las condiciones de humedad, sobre materiales de diferente origen y edad y en diferentes posiciones fisiográficas (laderas, barrancos, playas, materiales recientes, etc.).

En la ilustración 1 se presenta la distribución de los distintos órdenes de suelos para la isla, indicando además la superficie ocupada por rocas y tejido urbano.

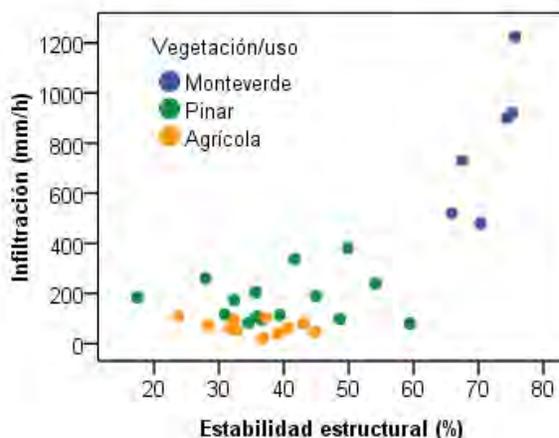


**Ilustración 1;** Distribución de los órdenes de suelos en Tenerife.

#### 4. LA INFILTRACIÓN DE LOS SUELOS. ESTUDIO EN ZONAS LLANAS

La caracterización de la infiltración se realizó utilizando el método del doble anillo, uno de los métodos más extendidos para su estudio en zonas llanas por su simplicidad y flexibilidad, Hills RC (1970). Los resultados obtenidos hasta el momento muestran la gran dependencia de este proceso con las propiedades edáficas y la tipología del suelo.

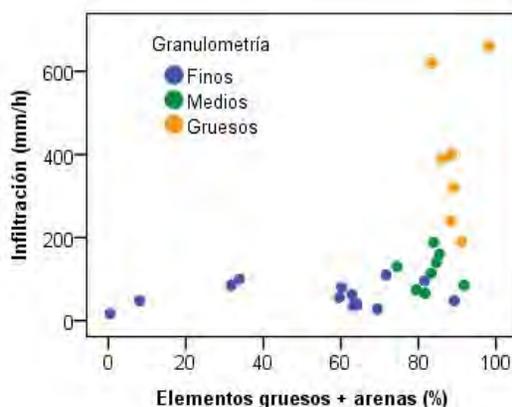
En algunos suelos de la isla, el desarrollo y estabilidad estructural son las propiedades con mayor influencia en la conformación de su espacio poroso, como los Andisoles no vítricos (alofánicos y organominerales). Estos Andisoles son los suelos que presentan los mayores valores de infiltración (superan los  $700 \text{ mmh}^{-1}$ ), a la vez que muestran la mayor estructuración y estabilidad de los agregados en condiciones naturales. Su elevado desarrollo estructural está relacionado fundamentalmente con su alto contenido de materia orgánica y POCA (Nanzyo M, Shoji S, Dahlgren R, 1993). Sin embargo, se observa una marcada dependencia de la estabilidad estructural con el uso y manejo del mismo (ilustración 2). El cambio de condiciones naturales a uso agrícola supone la disminución de su estabilidad estructural y de la tasa de infiltración (de  $700 \text{ mmh}^{-1}$  hasta  $70 \text{ mmh}^{-1}$ ).



**Ilustración 2;** Relación entre infiltración y estabilidad estructural.

Los Aridisoles presentan un comportamiento totalmente opuesto por su gran inestabilidad estructural y baja infiltración, con valores que en algunos casos no superan los  $15 \text{ mmh}^{-1}$ . Su escaso contenido en materia orgánica condiciona un bajo desarrollo estructural. Además, su cercanía al mar puede contribuir también a su debilidad estructural por la dispersión de sus constituyentes por efecto del sodio.

En los Andisoles vítricos y los Entisoles la textura marca la conformación del espacio poroso y por lo tanto la infiltración (ilustración 3). Estos suelos se caracterizan por un elevado porcentaje de elementos gruesos y una granulometría dominada por la fracción arena lo que supone la prevalencia de macroporos y, por ello, una gran cantidad de canales de flujo (Nanzyo M, Shoji S, Dahlgren R, 1993). Los suelos con texturas más gruesas muestran valores de infiltración elevados que promedian los  $400 \text{ mmh}^{-1}$  y que en algunos casos alcanzan  $600 \text{ mmh}^{-1}$ . En los suelos de granulometría media los valores decaen hasta ser cercanos a  $120 \text{ mmh}^{-1}$ , mientras que en aquellos más finos sus valores apenas alcanzan los  $60 \text{ mmh}^{-1}$ .



**Ilustración 3;** Relación entre infiltración y granulometría

Para los Vertisoles y los Alfisoles el contenido y la naturaleza de las arcillas toma especial importancia. En los Vertisoles la abundancia de arcillas hinchables supone la conformación de un espacio poroso dominado en húmedo por los microporos que dificultan el flujo de agua a través del suelo. Su valor promedio es de  $30 \text{ mmh}^{-1}$ , si bien en algunos casos no alcanzan los  $10 \text{ mmh}^{-1}$ . En una situación similar se encuentran los Inceptisoles con características vérticas, que presentan los valores de infiltración más bajos de todo este orden ( $70 \text{ mmh}^{-1}$ ) y que se asemejan en este aspecto a los suelos del orden Vertisol. En los Alfisoles son los fenómenos de lavado de arcilla los que determinan principalmente su comportamiento hidrológico por la colmatación total o parcial de sus poros. Por otro lado, los frecuentes rejuvenecimientos superficiales por aporte de piroclastos que han sufrido estos suelos hacen variar sus propiedades y su proceder ante la infiltración. Los Alfisoles que no han sufrido rejuvenecimientos presentan valores de infiltración considerablemente menores ( $60 \text{ mmh}^{-1}$ ) que los rejuvenecidos ( $160 \text{ mmh}^{-1}$ ).

Por último, los Inceptisoles modales, Inceptisoles ándicos y los Alfisoles rejuvenecidos, presentan un conjunto de características edáficas que podrían calificarse como equilibradas desde el punto de vista de la infiltración. Comparten una infiltración que ronda entre  $140$  y  $180 \text{ mmh}^{-1}$ .

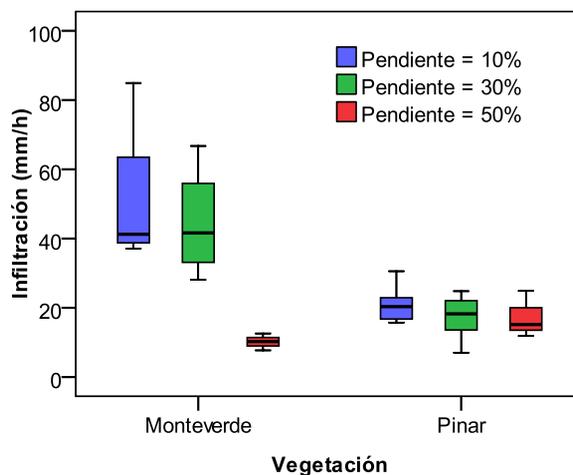
#### **4.1. Efecto de la pendiente en la infiltración del agua en el suelo**

La influencia de la pendiente en la infiltración se analizó utilizando un simulador de lluvia. Estos equipos usan un dispositivo que simula la formación de gotas de lluvia. Los simuladores de lluvia son en la actualidad los dispositivos más utilizados y eficaces para el estudio del proceso de infiltración y escorrentía en zonas naturales (Cerdà A, 1998; Pierson FB, Robichaud PR, Spaeth KE, 2001).

Estos estudios han desvelado no sólo la influencia de la pendiente del terreno en la infiltración, sino también la de otros factores como las características del mantillo o de la vegetación de la zona. En general la pendiente del terreno tiene una enorme influencia en la infiltración de estos suelos, especialmente a partir de una determinada inclinación. La infiltración decrece considerablemente en los suelos al aumentar la pendiente, pudiendo llegar a ser hasta diez veces menor en pendientes del 50 % frente a los suelos con una inclinación del 10%. Por otro lado, como se aprecia en la ilustración 4, la magnitud del descenso de la infiltración no es progresiva y lineal con el incremento de la pendiente, sino que muestra umbrales a partir de los que los cambios son sustanciales.

Los resultados indican que este comportamiento está también relacionado con la vegetación. El mantillo está formado principalmente por material vegetal en proceso de descomposición. Sus propiedades están íntimamente relacionadas con la vegetación de la zona, por lo que su respuesta ante la infiltración dependerá de este factor. Los estudios realizados muestran una gran divergencia en cuanto a las propiedades del mantillo para las dos vegetaciones forestales presentes en los Andisoles de Tenerife (monteverde y pinar). Esta diferencia está relacionada principalmente con la consistencia de las partículas que lo componen y su repelencia al agua (ilustración 5). Las partículas del mantillo se encuentran sueltas en el caso del monteverde y cementadas en el pinar, donde son además considerablemente más repelentes al agua. En definitiva, en los suelos

con monteverde el mantillo no constituye un horizonte limitante al paso del agua dada su gran porosidad y baja hidrofobicidad. Por el contrario, las características en pinar, con una menor porosidad y una mayor repelencia al agua del horizonte, hacen que el mantillo pueda suponer un impedimento al paso del agua y, por lo tanto, controlar el proceso de infiltración del agua de lluvia.



**Ilustración 4;** Infiltración en Andisoles en función de la pendiente y la vegetación



**Ilustración 5;** Características del mantillo en pinar (arriba) y monteverde (abajo)

Como consecuencia, en los Andisoles con monteverde el proceso de infiltración viene determinado principalmente por el elevado desarrollo estructural que presentan los suelos, tal y como sucedía en el estudio en las zonas llanas. En este caso, la infiltración ronda los  $50 \text{ mmh}^{-1}$  para pendientes suaves (10%) y  $45 \text{ mmh}^{-1}$  para moderadas (30%), lo que indica el escaso efecto que tiene la inclinación del terreno en estas condiciones. Únicamente en pendientes elevadas (50%), los valores de este parámetro decrecen sensiblemente hasta llegar a los 10

$\text{mmh}^{-1}$ , indicando la prevalencia de la inclinación del terreno sobre la elevada porosidad del suelo en estas condiciones. Este comportamiento muestra la presencia de un umbral de pendiente entre 30% y 50% a partir del cual la infiltración pasa de estar dominada por la elevada porosidad del suelo a estar controlada por la pendiente y la gravedad.

Por otro lado, a pesar de que los suelos con pinar tienen un alto desarrollo estructural y porosidad, el efecto limitante a la entrada de agua que muestra el mantillo hace que la influencia de las propiedades del suelo sobre la infiltración se vea limitada. En esta vegetación, se aprecian valores bajos de infiltración para todas las pendientes estudiadas, no superan en ningún caso los  $20 \text{ mmh}^{-1}$  y la diferencia entre las pendientes suaves (10%) y elevadas (50%) no es superior a los  $5 \text{ mmh}^{-1}$ . Estos resultados indican la escasa importancia de la porosidad del suelo y la dominancia de la gravedad en el proceso, potenciada por la elevada repelencia al agua del mantillo. Al contrario de lo que ocurría en el caso de los Andisoles con monteverde, en esta vegetación la gravedad domina la infiltración ya para pendientes suaves (10%), por lo que se puede estimar que el umbral a partir del que este factor controla el proceso se sitúa por debajo de esta inclinación.

Estos resultados modifican sustancialmente el escenario hidrológico mostrado por los Andisoles naturales en zonas llanas, en el que no se apreciaban limitaciones de consideración en el proceso de infiltración del agua de lluvia en el suelo. La singularidad de los resultados de este estudio, tanto por el considerable descenso de los valores de infiltración en Andisoles naturales con inclinación como por la ausencia de una relación lineal entre la infiltración y la pendiente, es indicativa de la dificultad que entraña la estimación de esta propiedad a partir de los datos de zonas llanas. En condiciones de pendiente, propiedades edáficas como la repelencia al agua adquieren mayor relevancia que en las zonas llanas y ven potenciada su influencia en el proceso de infiltración del agua en el suelo.

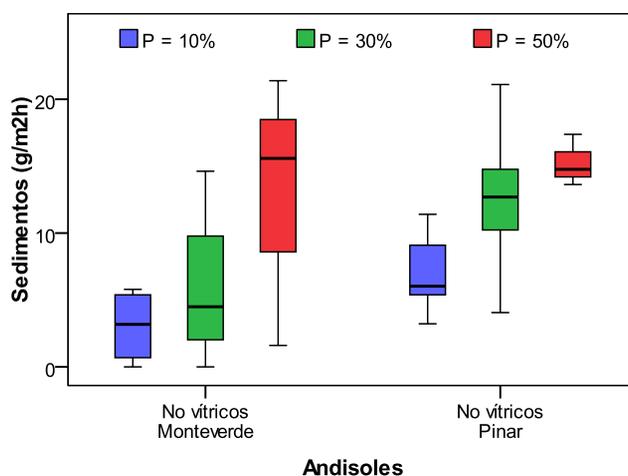


Ilustración 6; Erosión en Andisoles en función de la pendiente y la vegetación

En cuanto a los procesos erosivos (ilustración 6), aunque se aprecia una relación directa entre la pendiente del terreno y la pérdida de suelo vinculada con la disminución de la infiltración, los valores absolutos de erosión en estos suelos son considerablemente menores a los que se presentan otras tipologías edáficas. Las singularidades mineralógicas de estos suelos, que se traducen en una elevada estabilidad estructural, además del efecto protector del mantillo que los cubre, parecen ser los responsables de su baja susceptibilidad a la erosión.

#### REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- Ben-Hur, M., Agassi, M., Keren, R., Zhang, J., (1998); Compaction, aging, and raindrop-impact effects on hydraulic properties of saline and sodic Vertisols: *Soil Science Society of America Journal*, vol. 62, 1377-1383.
- Cerdà, A., (1998); Changes in overland flow and infiltration after a rangeland fire in a Mediterranean scrubland: *Hydrological Processes*, vol. 12, 1031-1042.
- Consejo Insular de Aguas de Tenerife, (2004); [http://www.aguastenerife.org/4\\_tfeyelagua/index.html](http://www.aguastenerife.org/4_tfeyelagua/index.html).
- Doerr, S.H., Shakesby, R.A., Walsh, R.P.D., (2000); Soil water repellency: Its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance: *Earth-Science Reviews*, vol. 51, 33-65.
- Emerson, W.W., (1977); Physical properties and structure. *En* Russell, JS, Greacen, EL, eds., *Soil factors in crop production in a semi-arid environment*: Queensland, University of Queensland Press, pp. 78-104.
- Hillel, D., (1980); *Fundamentals of soil physics*: Nueva York, Academic Press, 413 pp.
- Hills, R.C., (1970); The determination of the infiltration capacity field soils using the cylinder infiltrometer, *British Geomorph. Res. Group*, 25 pp.
- Nanzyo, M., Shoji, S., Dahlgren, R., (1993); Physical characteristics of volcanic ash soils. *En* Shoji, S, Nanzyo, M, Dahlgren, R, eds., *Volcanic ash soils: Genesis, properties and utilization: Developments in soil science 21*: Amsterdam, Elsevier Science Publishers B.V., pp. 288.
- Pierson, F.B., Robichaud, P.R., Spaeth, K.E., (2001); Spatial and temporal effects of wildfire on the hydrology of a steep rangeland watershed: *Hydrological Processes*, vol. 15, 2905-2916.
- Porta, J., López-Acevedo, M., Roquero, C., (2003); *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. 3ª edición.: Madrid, Ediciones Mundi-Prensa, 929 pp.
- Soil Survey Staff, (1999); *Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*: Washington, D.C., N.R.C.S. USDA, 869 pp.



# LOS TRABAJOS DEL PROYECTO REDESAC EN EL NORTE DE GRAN CANARIA: ESTIMACIÓN DE LA RECARGA NATURAL MEDIA MEDIANTE EL BALANCE DE CLORUROS ATMOSFÉRICOS

Gema Naranjo (*gnaranjo@proyinv.es*), Tatiana Cruz-Fuentes, Annetty Benavides, María del Carmen Cabrera, Pilar Hernández-Quesada, Esmeralda Estévez.  
Dpto. de Física. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Campus de Tafira. 35017 Las Palmas de Gran Canaria.

Luis Fernando Martín. Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria / Dpto. de Ingeniería Civil. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Las Palmas de Gran Canaria.

Emilio Custodio Gimena. Dpto. de Ingeniería del Terreno / Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea. Universidad Politécnica de Cataluña (UPC). Jordi Girona, 1-3. 08034 Barcelona.

**RESUMEN:** El proyecto de investigación REDESAC del Plan Nacional de Investigación del Ministerio de Ciencia e Innovación está dedicado a la evaluación de la recarga a los acuíferos, con énfasis en la evaluación de su notable incertidumbre. En Canarias el proyecto se ha focalizado en la zona norte de Gran Canaria, donde se producen las mayores precipitaciones de la isla, influenciadas por los vientos alisios y la morfología del relieve. Es en este área donde también se sitúan en superficie los materiales más jóvenes y permeables de la isla, por lo que se considera la zona de mayor recarga del acuífero insular. Con los primeros datos obtenidos en el Proyecto se ha llevado a cabo el cálculo de la recarga natural mediante el método del balance del ión cloruro de origen atmosférico, considerando su carácter conservativo. Los resultados preliminares revelan que la recarga media multianual estimada supone aproximadamente un 24% de la precipitación y varía incrementándose al aumentar la altura. La aplicación de esta metodología en la zona de estudio permite una mejora en las estimaciones previas de los recursos hídricos subterráneos en este sector de la isla. Esto ayuda a mejorar los criterios de planificación a incorporar al Plan Hidrológico Insular que se elabora en cumplimiento de lo que se deriva de la transposición de la DMA a la legislación de aguas canarias, como subsidiaria de la española.

## 1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la recarga a los acuíferos por la precipitación es esencial para la evaluación de las aguas subterráneas, para su conservación y gestión, y para mantener su papel ambiental. La recarga es un fenómeno natural muy complejo que entraña una notable incertidumbre, por lo que hay que abordar su evaluación a nivel regional mediante la utilización de diversas técnicas simultáneas, lo más independientes posible entre sí. Paralelamente, la descarga de los acuíferos a otros cuerpos de agua superficial es también difícilmente cuantificable debido a la dispersión que se produce, más aún si se realiza subacuáticamente.

La evaluación de la recarga y descarga de acuíferos en varias zonas es el objetivo del proyecto de investigación REDESAC del Ministerio de Ciencia e Innovación titulado “Procesos de recarga y descarga de acuíferos mediante trazadores naturales”. Se trata de un proyecto coordinado entre tres grupos de investigación pertenecientes a la Universidad Politécnica de Cataluña, la Universidad Politécnica de Cartagena y la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, que tiene como objetivo concreto progresar en la investigación y desarrollo de las técnicas hidrogeoquímicas e isotópicas ambientales de estimación de la recarga a los acuíferos y de su descarga, incluyendo su funcionamiento, en áreas concretas con información previa.

En Gran Canaria, los trabajos del proyecto se están llevando a cabo en el norte de la isla. Paralelamente a la caracterización hidrogeológica detallada de varias cuencas de la zona, se pretende utilizar diversas técnicas para evaluar la recarga media anual procedente de la precipitación. El objetivo es afinar en la cuantificación de este parámetro y comparar los grados de incertidumbre de los diversos métodos. La presente publicación presenta una primera estimación de la recarga media multianual mediante el balance de cloruros de aportación atmosférica en el área y recoge parte de los trabajos ya publicados en Cruz et al. (2012).

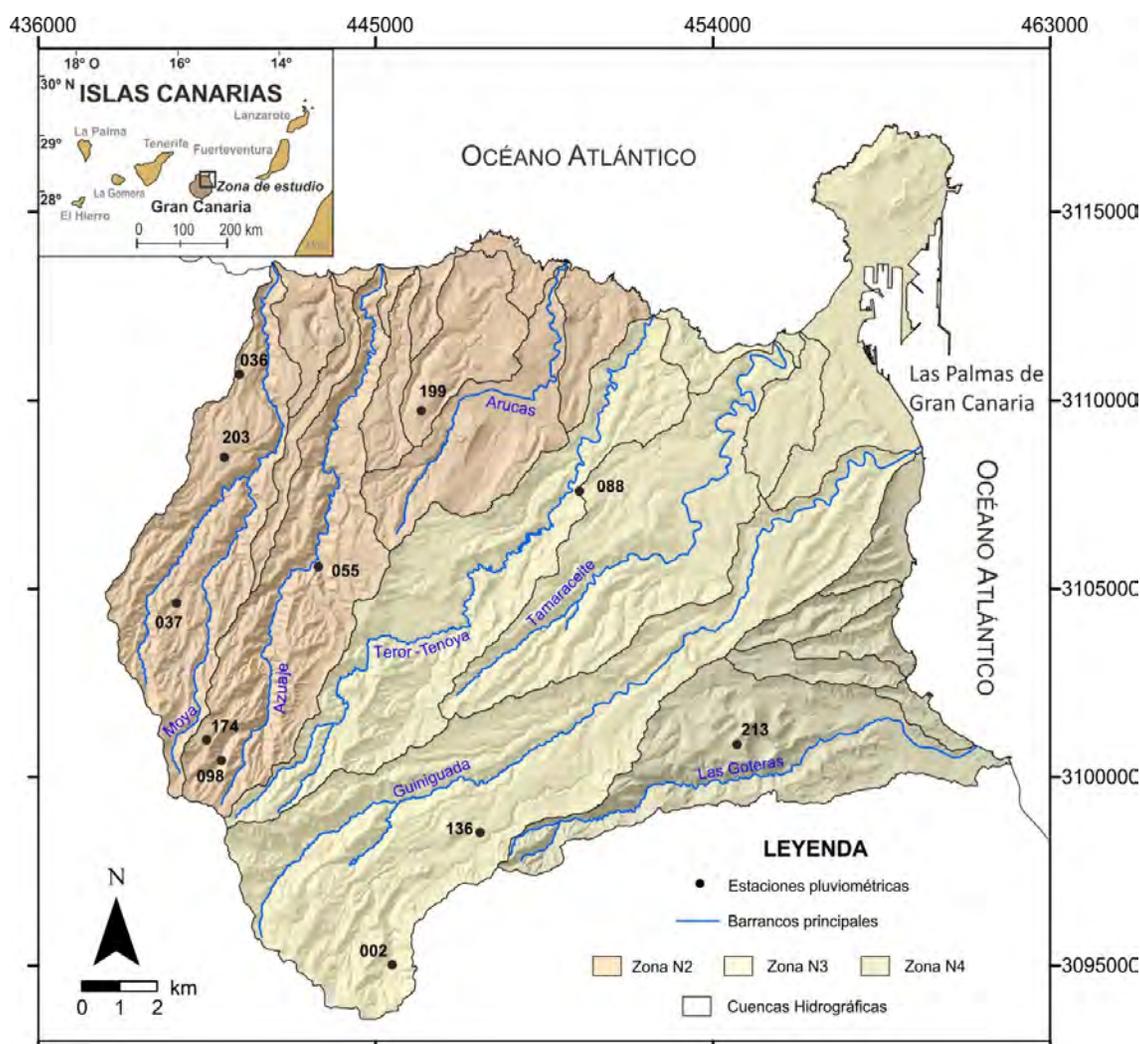
## **2. LA ZONA DE ESTUDIO**

La isla de Gran Canaria (Islas Canarias, España) presenta una morfología cónica, cuya cota máxima se localiza en el Pico de las Nieves, a 1.949 m s.n.m., y una orografía irregular formada por una serie de profundos barrancos radiales que nacen en el centro de la isla y desembocan en el mar. El área de estudio tiene una extensión de 312 km<sup>2</sup> y se localiza en el sector noreste de la isla, ocupando las zonas hidrogeológicas N3, N4 y parte de la N2 de la zonificación hidrogeológica de Gran Canaria (PHGC 1999). Los límites norte y este están definidos por el Océano Atlántico y los límites oeste y sur coinciden con las divisorias de las cuencas hidrográficas que conforman dichas zonas (Figura 1). El clima de la zona es variable debido al gradiente altitudinal y al efecto de los vientos alisios. Predominan las condiciones climáticas características de la zona norte insular, húmeda y nubosa. La precipitación media de la zona varía entre 820 mm/a en las zonas altas y 115 mm/a en la zona de costa, con una precipitación media de 375 mm/a. Las lluvias se concentran principalmente entre los meses de noviembre y abril y se producen en gran medida en las zonas de medianías (entre los 300 y 800 m s.n.m), donde es mayor la influencia de los vientos alisios y tiene lugar la formación del característico mar de nubes. La temperatura media anual varía desde 12°C en las zonas altas a 22 °C en la costa, con una temperatura media de 18°C.

La geología de la isla tiene su origen en el vulcanismo intraplaca de punto caliente, definiéndose tres etapas de evolución: juvenil (14,5-8,0 M.a.), inactividad volcánica (8,0-5,0 M.a) y rejuvenecimiento (desde 5,0 M.a a la actualidad) (Pérez-Torrado 2008). En la zona de estudio afloran fundamentalmente lavas e ignimbritas de los grupos Roque Nublo y Post Roque Nublo, pertenecientes a la etapa de rejuvenecimiento y sedimentos de la Formación Detrítica de Las Palmas, de la etapa de inactividad volcánica. La geología profunda revela que la may-

oría de los pozos de la zona toman el agua de los materiales del grupo Roque Nublo y los materiales fonolíticos-traquíuticos infrayacentes, pertenecientes a la etapa juvenil.

El funcionamiento hidrogeológico de Gran Canaria se caracteriza por la existencia de un acuífero único insular, con una superficie piezométrica en forma de domo que alcanza máximos en el centro de la isla. La recarga natural se produce por infiltración de la lluvia en las zonas de cumbre y medianías, circulando preferentemente por los materiales volcánicos más recientes. La descarga se produce al mar y por las extracciones de pozos y galerías, que han ido sustituyendo a las descargas naturales intermedias por manantiales (nacientes) que existían donde afloran materiales menos permeables o en valles profundos (SPA-15 1975; Custodio 1978; Custodio y Cabrera 2008). La zona de estudio constituye la principal área de recarga de la isla, dado que presenta la mayor pluviometría, menores temperaturas y condiciones edáficas favorables.



**Figura 1.** Localización de la zona de estudio. Se sitúan los colectores de agua de lluvia pertenecientes a la red de control que coinciden con las estaciones pluviométricas de la red de pluviómetros del CIAGC.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Recogida de muestras

Las muestras de lluvia han sido obtenidas en 10 colectores colocados a distintas altitudes, distribuidos a lo largo de las cuencas de los barrancos de Moya-Azuaje, y los barrancos Guinguada-Tenoya (Figura 1). Cada colector está situado junto a un pluviómetro que forma parte de la red de control pluviométrica del Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria, lo que permite establecer una relación entre la muestra recogida y el dato de pluviometría registrado en dicho periodo de muestreo. Debido a las características climáticas de la zona de estudio y con el fin de recoger la mayor cantidad de muestra en cada episodio lluvioso, se utilizan a modo de colector recipientes de plástico de aproximadamente 30 L de capacidad y de boca ancha. Para evitar la evaporación durante el muestreo se añade una lámina flotante de vaselina líquida en los colectores y para evitar la destrucción de las muestras por parte de animales se cubren con una malla de plástico (Figura 2).



**Figura 2.** Captador del agua de lluvia en uno de los puntos de muestreo.

Las muestras de lluvia se toman mensualmente en los meses lluviosos y de forma acumulada hasta obtener el agua suficiente para su análisis en los meses menos lluviosos. Los análisis químicos en laboratorio incluyen la determinación de los iones mayoritarios, más la sílice de forma ocasional. A partir de los análisis del agua de lluvia (que integran la deposición atmos-

férica húmeda y seca) se ha estudiado la evolución espacial y la deposición atmosférica total con su componente de aerosol marino y de polvo local y sahariano.

El muestreo comenzó en octubre de 2008 (tabla 1) en las cuencas de los barrancos de Moya y Azuaje, con una red de control de agua de lluvia establecida como parte de la investigación realizada en el marco de una tesis doctoral actualmente en desarrollo (Hernández-Quesada et al. 2011) en el norte de Gran Canaria. Dicha red de control posteriormente fue ampliada hacia el noreste de la isla en febrero de 2010, hacia las cuencas de los barrancos Guinguada y Tenoya. Actualmente, y debido a la sequía que ha caracterizado el año hidrológico 2011-2012, se ha tomado la decisión de prolongarla hasta octubre de 2013, con el fin de obtener la mayor información posible para una mejor estimación de la recarga.

Junto con las muestras recogidas para su análisis químico, también se toman muestras para análisis isotópico de  $^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$ , para una mejor caracterización del agua de lluvia y por tanto, de la recarga.

**Tabla 1.-** Resumen de las estaciones muestreadas.

Cuenca	Estación	Nombre	Fecha inicio muestreo	Fecha fin Muestreo	Número muestreos**	Análisis isotópicos***
AZUAJE-MOYA	036	Mondragones	06/11/2008	Activa	32	19
	037	Fontanales	31/10/2008	Activa	35	22
	055	Las Madres	30/10/2008	Activa	36	23
	098*	La Retamilla	31/08/2010	Activa	19	15
	174*	El Montañón	31/10/2008	01/07/2010	18	18
	203	Sta. Cristina	31/10/2008	Activa	34	22
GUNIGUADA-TENOYA	002	Hoya Gamonal	04/02/2010	Activa	20	17
	088	El Toscón	04/02/2010	Activa	15	13
	136	San Mateo	04/02/2010	Activa	19	17
	199	Lomo S. Pedro	04/02/2010	Activa	16	14
	213	Campo Golf	04/03/2010	Activa	14	12

\* Las estaciones 174 y 098 se consideran la misma por su proximidad. \*\*Número de campañas realizadas hasta julio de 2012 (muestreos mensuales). \*\*\*Número de análisis isotópicos realizados hasta febrero de 2012.

### 3.2. Cálculo de la recarga

El método de balance de cloruro atmosférico para estimar la recarga media multianual se basa en la comparación de la deposición atmosférica de cloruro (húmeda y seca) con respecto al contenido del mismo en la recarga al acuífero, suponiendo que no existe otro aporte de cloruro (Custodio et al. 1997; Custodio 2010). Se parte de la hipótesis de que el ión cloruro es conservativo en la recarga, no interacciona de forma significativa con el medio, es altamente soluble, químicamente estable y, además, de fácil medición con precisión adecuada.

En régimen transitorio y en ausencia de aportes de cloruro diferentes del atmosférico, el agua subterránea freática recibe un flujo másico que coincide con la aportación por la lluvia más la deposición seca, descontando la salida o entrada producida por escorrentía directa (Alcalá y Custodio 2007).

Para ello se requiere conocer la aportación como deposición atmosférica media de cloruro y la salida como recarga y escorrentía. El balance medio plurianual es:

$$R \cdot C_R = A_p - E \cdot C_E$$

donde,

R es la recarga ( $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ) para una precipitación P

$A_p$  es la deposición de cloruro atmosférico, expresada como flujo másico ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )

E es la escorrentía ( $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ )

$C_R$  y  $C_E$  las respectivas concentraciones de cloruro de la recarga y la escorrentía ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )

Los productos  $P \cdot C_p$ ,  $R \cdot C_R$  y  $E \cdot C_E$  son los flujos másicos y se expresan como  $A_p$ ,  $A_R$  y  $A_E$  en  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  respectivamente para un periodo anual de control. En zonas donde el valor de  $A_E$  es muy reducido, la ecuación anterior del balance se simplifica a:

$$R \cdot C_R = A_p$$

La aportación  $A_p$  es obtenida del promedio de las acumulaciones de las aportaciones de cada muestreo, de tal forma que, para un periodo de muestreo dado (i), la aportación viene dada por

$$A_p = 1 / n \sum Cl_{P_i} \cdot P_i$$

siendo,

$Cl_p$  la concentración de cloruros en el periodo muestreado ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )

P, la precipitación registrada en el periodo de muestreo ( $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ )

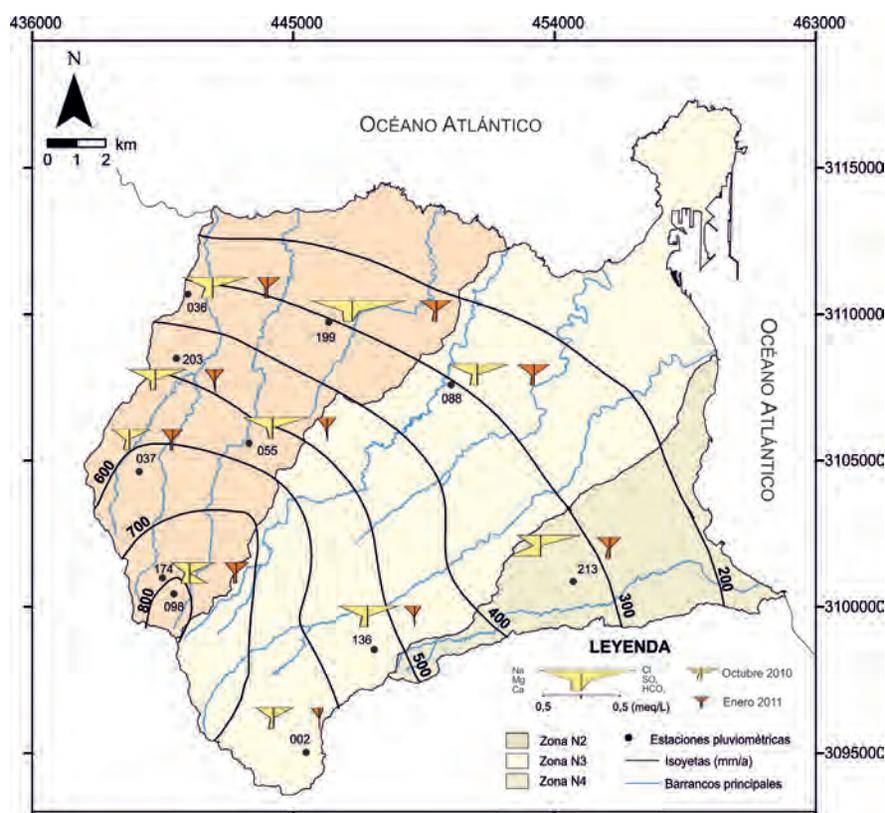
N, número de días de dicho periodo

Debido a la falta de datos de escorrentía, y a que ésta solo se produce de forma puntual asociada a la existencia de temporales esporádicos que descargan el agua al mar o se retiene en las presas, este término no se ha tenido en cuenta en esta primera aproximación, aunque ello conlleva una sobrevaloración de la recarga en los años en que el agua corre por los barrancos. Una primera estimación de la sensibilidad a la escorrentía se ha llevado a cabo a partir de los datos de escorrentía considerados en el SPA-15 (1975). En este proyecto, se estimó que los coeficientes de escorrentía eran entre el 6-9% de la precipitación para la cuenca del barranco de Azuaje, en torno

al 18% en la cuenca del barranco de Tenoya y entre el 3-14% en la del barranco Guiniguada. Estimando una escorrentía media para la zona entre el 5% y el 10% de la precipitación, la sobrevaloración de la estimación de la recarga puede estar entre el 10 al 25%, con respecto a la estimada considerando un flujo másico de escorrentía ( $E \cdot C_F$ ) nulo o despreciable.

#### 4. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA Y DEL AGUA DE RECARGA

El agua de lluvia es de tipo clorurada-sódica, según reflejan los diagramas de Stiff modificados (Figura 3). La concentración de las sales disminuye con la altura, lo que es característico de zonas costeras con gran relieve y una importante componente ventosa. La concentración también varía según que la ubicación de los colectores esté en fondo de barranco o en divisoria, o en la zona de sotavento o barlovento. De forma generalizada, las mayores concentraciones son observadas en las muestras localizadas a menores cotas y tomadas durante los meses de marzo y octubre, que coinciden con los meses de menor pluviometría. Los diagramas de Stiff modificados del agua de lluvia para agosto y septiembre de 2010 (secos) y enero de 2011 (húmedos) ponen de manifiesto la diferencia de concentraciones de los iones mayoritarios en la lluvia en los meses de verano e invierno y su variación según la localización del colector.



**Figura 3.** Diagramas de Stiff modificados del agua de lluvia para los muestreos de octubre de 2010 (mes seco) y de enero de 2011 (mes húmedo). Se muestra la distribución de las isoyetas medias (mm/a) para el periodo 1970-2006.

En la Tabla 2 se muestran los resultados de la aportación media atmosférica de cloruro en cada colector para un periodo de muestreo de octubre de 2008 hasta noviembre de 2010. Esta aportación varía desde  $3,1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  a cota 1365 m hasta  $13,5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  a cota 443 m.

**Tabla 2.** Cálculo de la aportación de cloruro del agua de lluvia y resultados obtenidos en la estimación de la recarga media por el método del balance del ión cloruro en cada colector.  $A_p$  = aportación media de cloruro atmosférico en el periodo estudiado.  $\overline{Cl}_p$  = concentración media de cloruros de la precipitación en el periodo estudiado.

Zona	Estación	Cota (m.s.n.m.)	n Nº días	Precipitación P, mm/a	$\overline{Cl}_p$ mg/L	$A_p = \frac{1}{n} \sum Cl_p \cdot P_i$ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$	$Cl_R$ mg/L	Recarga R, mm/a	R/P
N2	036	375	727	298	40,9	6,23	200	31	0,10
	199	443	301	431	48,4	13,48	100	135	0,31
	055	577	761	614	18,9	8,05	40	201	0,33
	203	645	761	490	28,1	8,57	80	107	0,22
	037	990	761	637	17,3	5,85	25	234	0,37
	098-174	1400	780	844	12,6	4,98	20	249	0,29
N3	088	315	272	342	36,2	4,57	200	23	0,07
	136	841	302	525	29,9	5,54	50	111	0,21
	002	1365	302	854	10,2	3,12	15	208	0,24
N4	213	485	780	315	71,8	12,66	400	32	0,10

El contenido en cloruro del agua de recarga ha sido estimado en función de los análisis químicos de las aguas subterráneas del lugar, que se supone que representan la recarga local. Esto puede suponer un cierto sesgo, con efectos que pueden crecer cuanto menor es la cota a causa de contribuciones de agua de procedencia más alta (Custodio 2010), pero este efecto se considera poco significativo para los pozos “canarios”, que son poco penetrantes. La salinidad de las aguas subterráneas aumenta de cumbre a costa (SPA-15 1975), lo que se refleja en el mapa de isocloruros de las aguas subterráneas (Figura 4). Este mapa se ha elaborado con las medianas de los análisis de 177 muestras correspondientes al año 1997 existentes en la Base de Datos del Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria, eliminando los pozos con alta concentración de nitratos para evitar la influencia del aporte de cloruros no atmosféricos procedentes de los retornos de riego.

## 5. BALANCE DE CLORURO. ESTIMACIÓN DE LA RECARGA NATURAL

Para el cálculo de la recarga, la concentración de cloruro del agua recargada en el área de cada colector ha sido obtenido a partir del mapa de isocloruros en las aguas subterráneas (Figura 4). Los resultados de la estimación de la recarga se muestran en las Tablas 2 y 3. Los

porcentajes de recarga estimados para cada colector oscilan entre un 7% y un 37% de la precipitación media y dependen de la altitud y la cuenca donde éstos se localizan.

Estos cálculos permiten estimar una recarga media total en la zona de 131 mm/a (31,5 hm<sup>3</sup>/a) para una superficie de 312 km<sup>2</sup>, lo que supone un promedio del 24% de la precipitación media.

En la estimación de la recarga los términos son inciertos, lo que hace que la recarga estimada también lo sea. La variabilidad natural de la recarga se puede expresar en términos absolutos a través de su desviación estándar,  $\sigma_R$ , o en términos relativos a través de su coeficiente de variación,  $CV_R = \frac{\sigma_R}{R}$  (Alcalá y Custodio 2007).

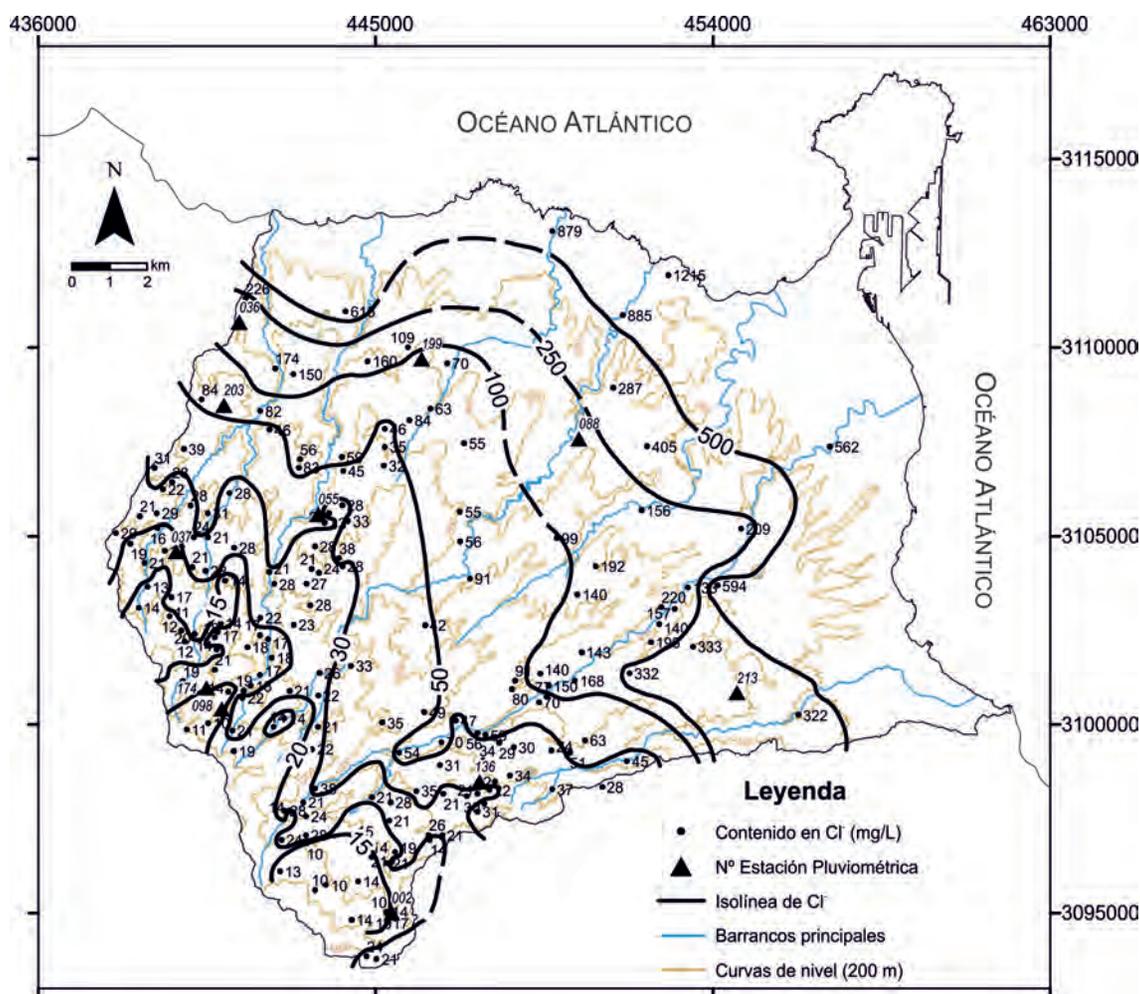


Figura 4. Mapa de isocloruros (mg/L) de las aguas subterráneas, elaborado con datos del inventario de puntos de agua realizado por el Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria en 1997.

**Tabla 3.** Precipitación media anual y recarga media anual estimada (mm/a y hm<sup>3</sup>/a) (2009-2010) para la zona norte de Gran Canaria. El área baja se localiza por debajo de la isoyeta de 400 mm/a, el área media desde la isoyeta de 400 mm/a hasta la isoyeta de 600 mm/a y el área alta por encima de la isoyeta de 600 mm/a. Las cifras indicadas son significativas en sus dos primeras cifras.

Zona	Área	Su- perfi- cie km <sup>2</sup>	Precipita- ción P	Recarga R			R/P %	% Recar- ga en el área
				mm/a	hm <sup>3</sup> /a	mm/a		
<b>N2</b>	Baja	57,7	233	13,5	32	1,9	1,4	12
	Media	31,7	552	17,6	187	6,0	4,5	40
	Alta	25,8	775	19,0	299	7,3	5,5	48
	<b>Total</b>	<b>115,2</b>	<b>520</b>	<b>50,1</b>	<b>173</b>	<b>15,1</b>		<b>100</b>
<b>N3</b>	Baja	69,3	247	17,8	17	1,2	0,9	8
	Media	41,7	525	21,9	158	6,6	5,0	45
	Alta	33,4	854	28,5	208	6,9	5,3	47
	<b>Total</b>	<b>144,4</b>	<b>542</b>	<b>68,2</b>	<b>128</b>	<b>14,7</b>		<b>100</b>
<b>N4</b>	Baja	43,4	238	11,1	24	1,1	0,9	69
	Media	3,2	525	1,7	158	0,5	0,4	31
	<b>Total</b>	<b>46,6</b>	<b>382</b>	<b>12,8</b>	<b>91</b>	<b>1,6</b>		<b>100</b>
<b>TOTAL</b>			<b>481,2</b>	<b>131,1</b>	<b>131</b>	<b>31,5</b>	<b>24,0</b>	

Para variables  $X_i$  normalmente distribuidas y caracterizadas por su valor medio  $\bar{X}_i$  y su desviación tipo  $S_{X_i}$ , la regla de propagación de errores para una función es  $X=f(X_i)$

$$S_x^2 = \sum (\partial f(X_i) / \partial X_i)^2 S_{X_i}^2$$

Considerando que la escorrentía superficial sea despreciable,  $\bar{R} = \bar{A} / \bar{C}$  ( $\bar{R}$  = recarga media;  $\bar{A}$  = aportación media de cloruro atmosférico;  $\bar{C}$  = concentración media de cloruro en la recarga local), y midiendo el error por el coeficiente de variación, se obtiene que  $CV_R^2 = CV_A^2 + CV_C^2$ .

En el área de estudio los valores de la desviación (S) son aún poco conocidos, pero con la experiencia local existente (cierta estabilidad por la deposición seca) y la comparación con estaciones de varios años de la Península Ibérica se puede establecer una primera aproximación, aunque hay variaciones de un lugar a otro aún por definir:  $CV_C = 0,2$  con  $CV_{CV_C} = 0,3$ ;  $CV_A = 0,20$  con  $CV_{CV_A} = 0,5$ . Así resulta  $CV_R = 0,28$  (28%) con una incertidumbre  $CV_{CV_R} = 0,58$  (58%).

## 6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El agua de lluvia en la zona de estudio es de composición clorurada-sódica, lo que es característico de zonas costeras con alta influencia marina. Se observa una marcada variación estacional en la concentración, siendo mayor durante los meses de verano debido a la disminución de las precipitaciones y el aumento de la deposición seca, ya que son los meses con mayor predominio de los vientos alisios, de procedencia marina directa y de mayor evaporación.

Los valores de aporte de cloruro a los colectores están muy influenciados por la distancia de estos al mar y su ubicación. En general, los valores más altos corresponden a las muestras tomadas en los colectores situados a cotas más bajas (Figura 1), los cuales presentan una concentración elevada de cloruro debido a la gran deposición seca, de la que una parte importante es aerosol marino (Cruz 2008). Estos valores están en consonancia con los obtenidos en otros estudios en Gran Canaria, que oscilan entre 4 y 5  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  en las cumbres y 20  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  en las áreas de costa (Gasparini et al. 1990; Custodio 1993; Muñoz 2005). Así, el aporte atmosférico de cloruro y de otros elementos químicos juega un papel importante en la salinización de las aguas subterráneas.

Según los resultados obtenidos, que coinciden con los esperables, la recarga producida en la parte media-alta de la zona de estudio es la principal entrada de agua al acuífero. Existen notables incertidumbres en la concentración de cloruros en la deposición dado el corto período de observación en el momento actual y la variabilidad del agua subterránea inherente a las características de los pozos y nacientes. Por ello, el volumen de recarga media total estimado asciende aproximadamente a 31,5  $\text{hm}^3/\text{a}$  (131  $\text{mm}/\text{a}$ ), lo que constituye el 24% de la precipitación media. Estos resultados deben considerarse como una primera aproximación, que hay que revisar y validar con series más largas de muestreo y con la aplicación de otros métodos hidrogeológicos, hidrogeoquímicos e isotópicos, teniendo en cuenta la escala temporal y espacial que les afecte. En este sentido, los trabajos del proyecto continúan, teniendo en cuenta además que el periodo de muestreo va a incluir un año hidrológico 2011-12 especialmente seco.

La primera evaluación presentada en este trabajo, independiente de los métodos de balance de agua en el suelo e hidrodinámicos, sirve para contrastar los resultados de la Planificación Hidrológica, donde se estima la recarga en un 19% de la pluviometría (PHGC 1999). Esta planificación tiene que ser revisada cada 6 años según lo establecido en la Directiva Marco del Agua Europea (DMA) y que se recoge en el actual Texto Refundido de La Ley de Aguas. A la autoridad del agua (Consejo Insular de Aguas) le corresponde mantener la red de observación necesaria y las condiciones para una aplicación del método que contribuya a reducir las incertidumbres.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se enmarca en el proyecto REDESAC (CGL2009-12910-C03-02) y el Programa CONSOLIDER-TRAGUA (CSD2006-00044) del Ministerio de Ciencia e Innovación.

## REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- Alcalá, F.J. y Custodio, E. (2007). *Recarga por la lluvia a los acuíferos costeros españoles mediante balance de cloruro en el suelo*. Volumen 1, Instituto Geológico y Minero de España. Madrid: 855-869. ISBN 978-84-7840-712-5
- Cruz, T. (2008). *Contribución de la modelación numérica e hidroquímica al conocimiento del acuífero de La Aldea (Gran Canaria)*. Tesis Doctoral Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- Cruz, T.; Benavides, A.; Naranjo, G.; Cabrera, M.C.; Hernández-Quesada, M.P.; Estévez, E.; Martín, L.F. y Custodio, E. (2012): Estimación de la recarga natural en la zona Noreste del acuífero insular de Gran Canaria (Islas Canarias, España) mediante el balance de cloruros atmosféricos. En Lambán, L.J.; Carceller, T.; Valverde, M. y Fernández-Jaúregui, C. (eds.): *Las aguas subterráneas: desafíos de la gestión para el siglo XXI*. Ed. Grupo Español de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos.
- Custodio, E. (1978). *Geohidrología de terrenos e islas volcánicas*. Centro de Estudios Hidrográficos. Publicación 128, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Madrid: 1-303
- Custodio, E. (1993): *Coastal aquifer salinization as a consequence of aridity: the case of Amurgaphonolitic massif, Gran Canaria island*. En: Custodio, E. y Galofré, A. (eds.). *Study and Modelling of Saltwater Intrusion into Aquifers*, CIMNE-UPC, Barcelona: 81-98.
- Custodio, E. (2010). *Estimation of aquifer recharge by means of atmospheric chloride deposition balance*. *Contributions to Science*. 6(1): 81-97
- Custodio, E. y Cabrera, M.C. (2008). *Síntesis de la hidrogeología de las Islas Canarias*. *Geo-Temas*. Vol. 10.
- Custodio, E.; LLAMAS, M.R. y SAMPER, J. (1997). *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica*. AIH-GE/IGME. Madrid. 1-455.
- DIRECTIVA MARCO DEL AGUA (DMA). Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.
- Gasparini, A.; Custodio, E.; Fontes, J.CH.; Jimenez, J. Y Núñez, J.A. (1990): *Exemple d'étude géochimique et isotopique de circulations aquifères en terrains volcanique sous climat semi-aride (Amurga, Grande Canarie, Iles Canaries)*. *Journal of Hydrology*, 114:61-91.
- Hernández-Quesada, P.; Cabrera M.C. y Custodio, E. (2011): Ensayo de balance hídrico de las cuencas de los barrancos de Moya y Azuaje (Norte de Gran Canaria): estimación de recarga mediante balance de la deposición atmosférica de cloruros. En L.J. Lambán, T. Carceller, M. Valverde y C. Fernández-Jaúregui (eds): *Las aguas subterráneas: desafíos de la gestión para el siglo XXI*.
- Muñoz, J. (2005): *Funcionamiento hidrogeológico del acuífero de La Aldea (Gran Canaria)*. Tesis Doctoral. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 310 pp. + Anejos.
- Pérez-Torrado, F.J. (2008). *Geología de Gran Canaria*. En: Itinerarios geológicos por las Islas Canarias. Gran Canaria. En: Pérez-Torrado, F.J. y Cabrera, M.C. (eds.). *Sociedad Geológica de España, Geo-Guías*, 5: 27-39.
- PLAN HIDROLÓGICO DE GRAN CANARIA (PHGC) (1999). Boletín Oficial de Canarias 73, 08/06/1999. Decreto 82/1999.
- SPA-15 (1975). *Estudio científico de los recursos del agua en las Islas Canarias (SPA/69/515)*. Ministerio de Obras Públicas - Dirección General Obras Hidráulicas/ UNESCO-PNUD.

## AGUAS MINERALES NATURALES EN TERRENOS VOLCÁNICOS DEL ARCHIPIÉLAGO CANARIO

Skupien Balon, Elzbieta. Dra. Ingeniera de Minas, Ejercicio Libre de la Profesión.  
*elzsku2006@yahoo.es*

Poncela Poncela, Roberto. Eurogeólogo. Ejercicio Libre de la Profesión.  
*rponcela\_geo@yahoo.es*

Morales González-Moro, Ángel. Ingeniero de Minas, Consejería de Empleo, Industria y Comercio. Gobierno de Canarias.  
*anmorgon@gobiernodecanarias.org*

Lario Báscones, Rafael. Ingeniero de Minas, Consejería de Empleo, Industria y Comercio. Gobierno de Canarias.  
*rlarbas@gobiernodecanarias.org*

**RESUMEN:** El Archipiélago Canario ocupa el séptimo lugar a nivel autonómico en la producción de agua mineral natural (AMN). Para poder diseñar futuros programas de dinamización de la industria relacionada con el agua mineral natural es necesario conocer y analizar la composición química de las aguas subterráneas existentes y catalogadas como mineral natural. En el presente estudio se actualizan conocimientos sobre las características hidrogeológicas de 16 captaciones de aguas subterráneas dispersas por diferentes terrenos volcánicos del Archipiélago Canario, y que están catalogadas o en fase de catalogación como AMN. La información ha sido recopilada y actualizada de los estudios que acompañan a las solicitudes de reconocimiento de condición de AMN. Las características analizadas son la distribución geográfica, parámetros generales (pH, temperatura y conductividad eléctrica del agua, residuo seco, componentes mayoritarios, sílice, parámetros hidrogeológicos disponibles para macizos del entorno de las captaciones de AMN (T y S) y, finalmente los perímetros de protección de las mismas. Se presenta la aplicación “Aguas Minerales” que gestiona toda la información en soporte SIG. Se establecen diferentes clasificaciones hidroquímicas de las AMN existentes en los terrenos volcánicos y comparaciones en base a la mediana de los parámetros y concentraciones de componentes mayoritarios de AMN en Canarias y las envasadas a nivel nacional, respectivamente. Finalmente se realiza una valoración de pautas para los futuros estudios hidrogeológicos relacionados con el AMN.

### 1. INTRODUCCIÓN

Las Aguas Minerales Naturales (AMN) se distinguen según la legislación española (RD 1798/2010, de 30 de octubre) de las otras aguas de bebida ordinarias por su:

- Naturaleza, caracterizada por su contenido en minerales, oligoelementos y otros componentes y, en ocasiones, por determinados efectos.
- Constancia química.
- Pureza original.

Esto hace necesario realizar estudios tendentes a caracterizar cualidades de constancia, calidad y características hidrogeológicas para mejorar el conocimiento de dichas aguas.

La alarma social generada sobre la calidad de algunas aguas de abasto en Canarias (exceso de flúor, sodio, etc.) ha hecho dispararse el consumo de aguas envasadas en el Archipiélago Canario, y confirma el creciente interés de ejecución de nuevas obras para la captación de Aguas Minerales Naturales para su embotellamiento, que revierten en seguridad durante situaciones excepcionales (vertidos accidentales en canales, aumento de concentración de iones indeseados, etc.).

Los conocimientos hidroquímicos e hidrogeológicos sobre AMN de Canarias se basan fundamentalmente en la información aportada por los titulares de las captaciones, como requerimiento previo a la declaración de la condición de agua mineral natural. La legislación de Minas vigente clasifica las aguas minerales, en sus dos denominaciones como “Agua Mineral Natural” y “Agua de Manantial” como un Recurso Minero de la Sección B, y para su aprovechamiento en el Archipiélago es necesario obtener autorización del Servicio de Minas de la Dirección General de Industria de la Consejería de Empleo, Industria y Comercio del Gobierno de Canarias.

## **2. OBJETIVOS**

Se trata de realizar un análisis de las principales características hidroquímicas de las aguas catalogadas o en fase de denominación como AMN, en base a los parámetros generales y componentes mayoritarios, estableciendo clasificaciones de dichas aguas.

## **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

Los datos analíticos correspondientes a los parámetros generales y componentes mayoritarios fueron recopilados y actualizados a partir de la información contenida en los correspondientes expedientes administrativos en las dependencias del Servicio de Minas, en sus sedes respectivas de Santa Cruz de Tenerife y de Las Palmas de Gran Canaria (DGI, 2008; Skupien, Morales y Poncela, 2008).

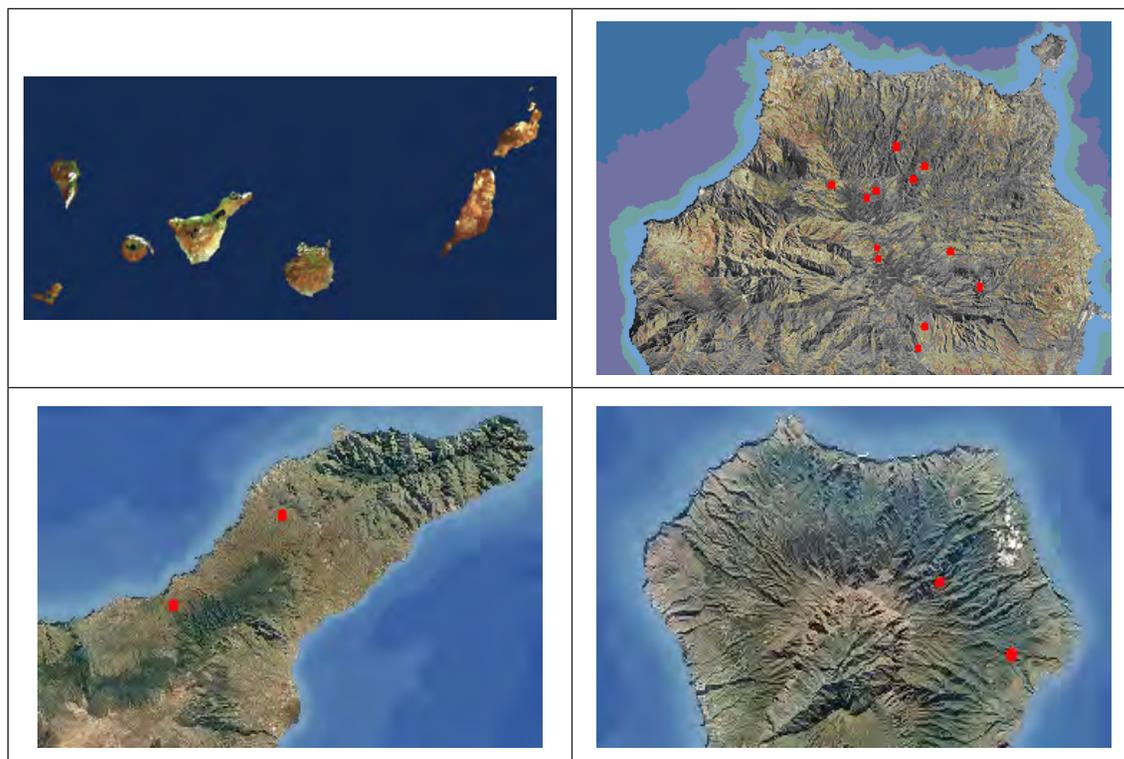
## **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1. Distribución geográfica de las AMN**

Se ha constatado que actualmente existen 16 aprovechamientos de aguas minerales naturales que se pueden considerar activos, o en fase de estudios y proyectos previos, y que se encuentran dispersos por la geografía canaria: 4 en la provincia de Santa Cruz de Tenerife (2

en Tenerife y 2 en La Palma) y 12 en la provincia de Las Palmas (12 en Gran Canaria); ver Figura 1 y Tabla 1.

De los 16 aprovechamientos activos, 8 están incluidos en las listas consolidadas de las aguas minerales naturales reconocidas por los Estados Miembros de Europa, de acuerdo con el Diario Oficial de la Unión Europea (DOUE 2012/C 83/01).



**Figura 1:** Distribución de las captaciones de AMN en Canarias (Base cartográfica: SITCAN (Gobierno de Canarias)).

**Tabla 1.-** Correspondencia nombre de captación con denominación/marca de las aguas de naturaleza Mineral Natural.

<b>Isla</b>	<b>Municipio</b>	<b>Nombre del manantial</b>	<b>Denominación comercial</b>	<b>Tipo</b>	<b>Lista UE</b>
TFE	La Orotava	Fonteide (El Mundo)	Fonteide	Galería	SÍ
TFE	Tacoronte	Krystal	Krystal	Sondeo	NO
LP	Santa Cruz de La Palma	Barbuzano	Aguas de La Palma	Galería	SÍ
LP	San Andrés y Sauces	Naciente de Marcos	Naciente de Marcos	Naciente	NO

Isla	Municipio	Nombre del manantial	Denominación comercial	Tipo	Lista UE	
GC	Telde	Cortijo de Jacón	Cortijo de Jacón	Pozo-Galería	NO	
GC	Tejeda	Molinillo (El)	Por determinar	Naciente	NO	
GC	Tejeda	Mina de Tejeda (La)	Por determinar	Naciente	NO	
GC	Teror	Culata (La)	La Culata	Galería	NO	
GC	Valleseco	Gambuesilla	Agua de Firgas	Pozo	NO	
GC	Valsequillo	Higueras (Las)	Fuente Niguana	Pozo	SÍ	
GC	Gáldar	Fuentebruma (Hoya de Juan Martín)	Fuentebruma	Sondeo	SÍ	
GC	Teror	Fuenteror (Hoya de la Palma)	Fuenteror	Pozo	SÍ	
GC	Aguimes	Milano (El)	Milano	Pozo	NO	
GC	Moya	Morisco	Morisco	Galería	NO	
GC	Moya	Pinillo	Pinillo	Pozo	NO	
GC	Valleseco	La Ideal II (El Rapa-dor)	La Ideal II	Agua de Firgas	Pozo	SÍ
		La Ideal I	La Ideal I		Pozo	SÍ
		San Antón II	San Antón II		Pozo	SÍ

Los aprovechamientos existentes sitúan al Archipiélago Canario en el octavo lugar a nivel de Comunidades Autónomas en la producción de aguas minerales (Figura 2). Teniendo en cuenta la distribución geográfica de las captaciones de AMN, se observa que Gran Canaria es la isla con el mayor número de captaciones y marcas, seguida de la isla de Tenerife y La Palma. Se destaca que actualmente en las restantes islas no existen captaciones de AMN.

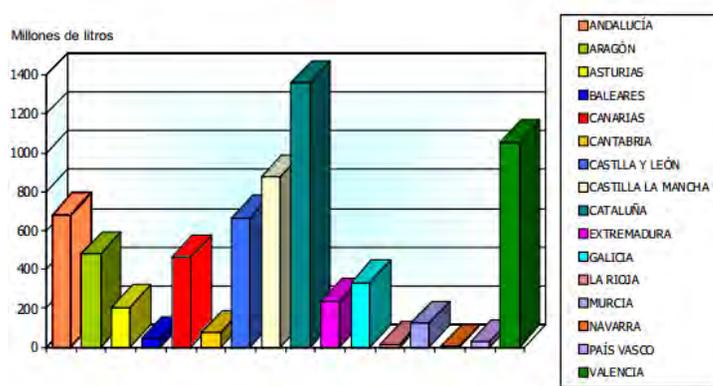
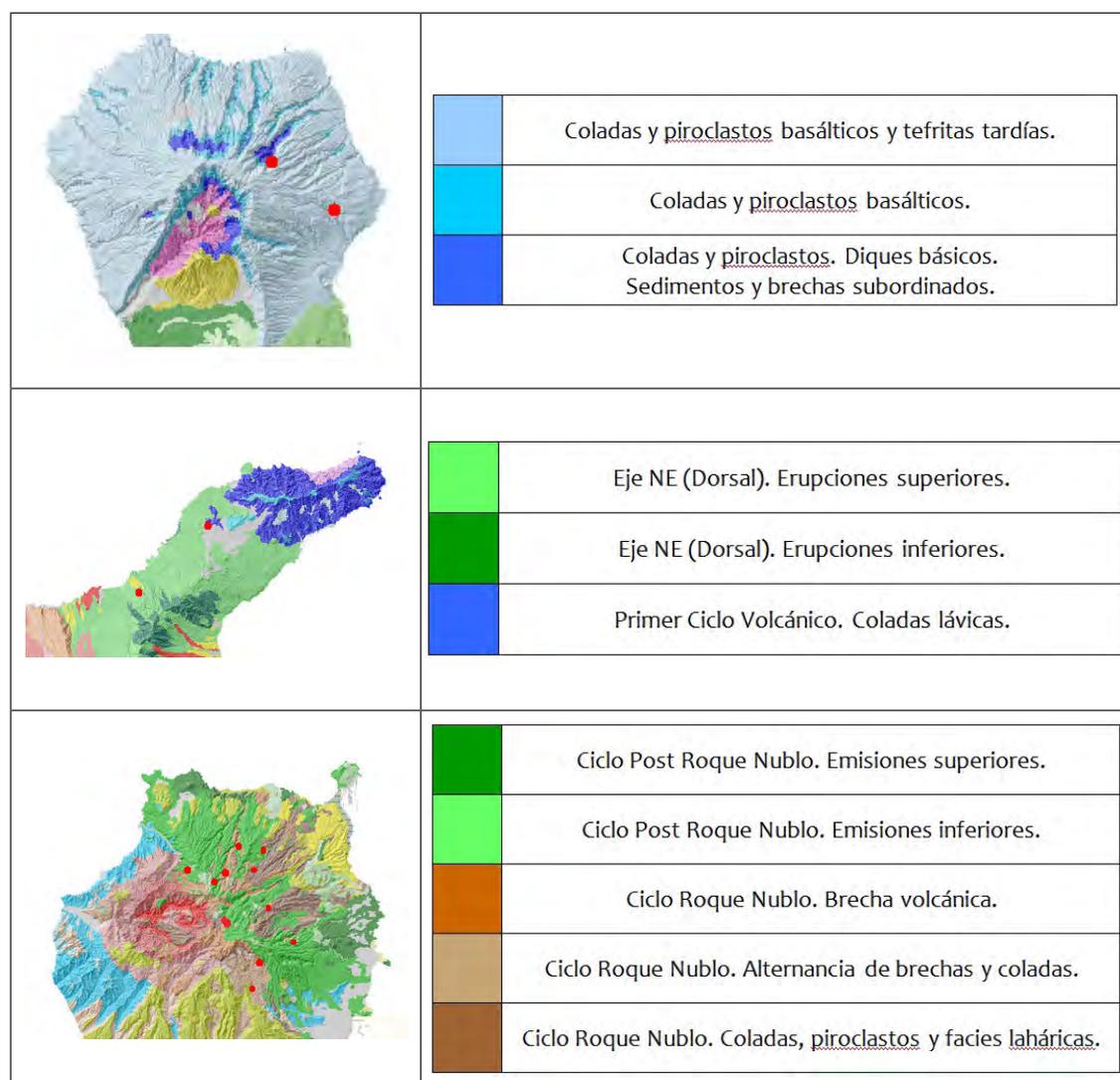


Figura 2: Producción de agua mineral por Comunidades Autónomas (Fuente IGME, 2009).

#### 4.2. Marco geológico de las AMN

El territorio de la Comunidad Autónoma de Canarias es fundamentalmente de naturaleza volcánica. Las rocas volcánicas habituales en Canarias son basaltos, traquibasaltos y traquitas (o fonolitas) y depósitos piroclásticos tanto básicos como ácidos. La diferencia esencial (no siendo única) entre ellas es el contenido en sílice, que es el componente más abundante en los magmas. En las islas coexisten zonas geológicamente antiguas (de edad miocena y post-miocena) con otras cubiertas con materiales de volcanismo reciente (de edades holocena y pleistocena, e histórico), dando lugar a una morfología compleja, propia de cada isla.

En la Figura 3 se presenta la distribución de los principales Edificios Volcánicos de cada isla, contrastada con la ubicación de las captaciones de aguas mineral natural.



**Figura 3:** Encuadre geológico de las captaciones de AMN de Canarias. Fuente: SITCAN. Elaboración propia.

#### 4.3. Caracterización hidroquímica en base a parámetros generales y componentes mayoritarios

Para poder diseñar futuros programas de dinamización de la industria relacionada con el agua mineral natural es necesario conocer y analizar la composición química de las aguas subterráneas existentes y catalogadas como mineral natural, para interpretar los datos aportados por las mismas y clasificar estas aguas según sus propiedades.

Las aguas subterráneas con la condición de agua mineral natural en terrenos volcánicos canarios presentan generalmente una baja salinidad, con conductividades eléctricas que oscilan entre 86 y 824  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Fig. 4). Los valores de temperatura del agua captada medidos “in situ” están por debajo de 20°C, hecho que las cataloga como “aguas frías”, mientras que los valores de pH varían entre neutros a ligeramente básicos y están comprendidos entre 6,9 y 8,3, respectivamente.

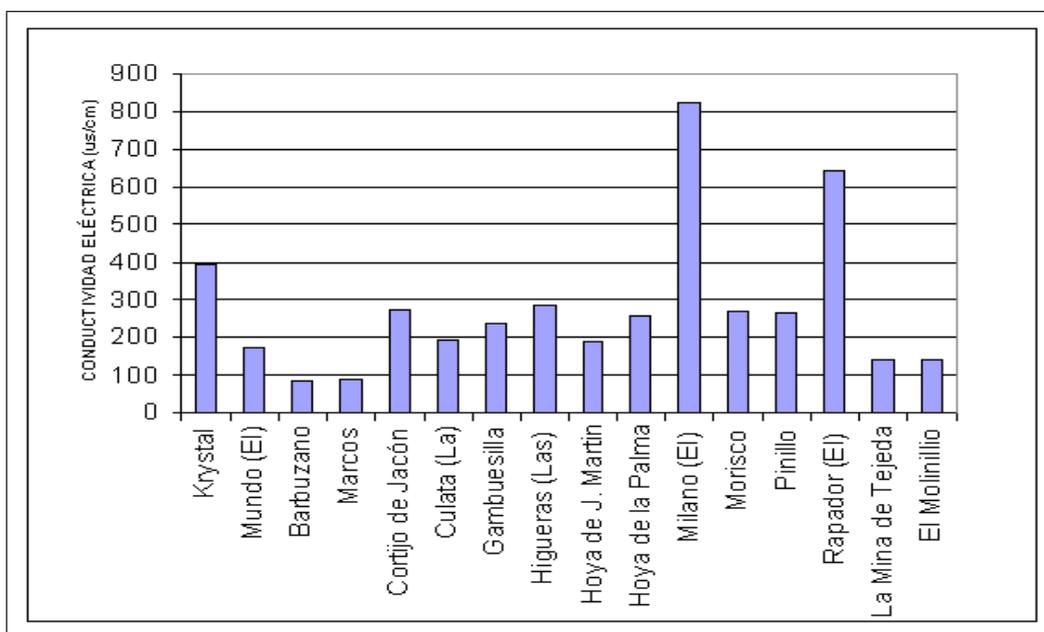


Figura 4: Comparación de los valores de la conductividad eléctrica de las AMN de Canarias.

Según el residuo seco (RS), las AMN del Archipiélago Canario se clasifican como:

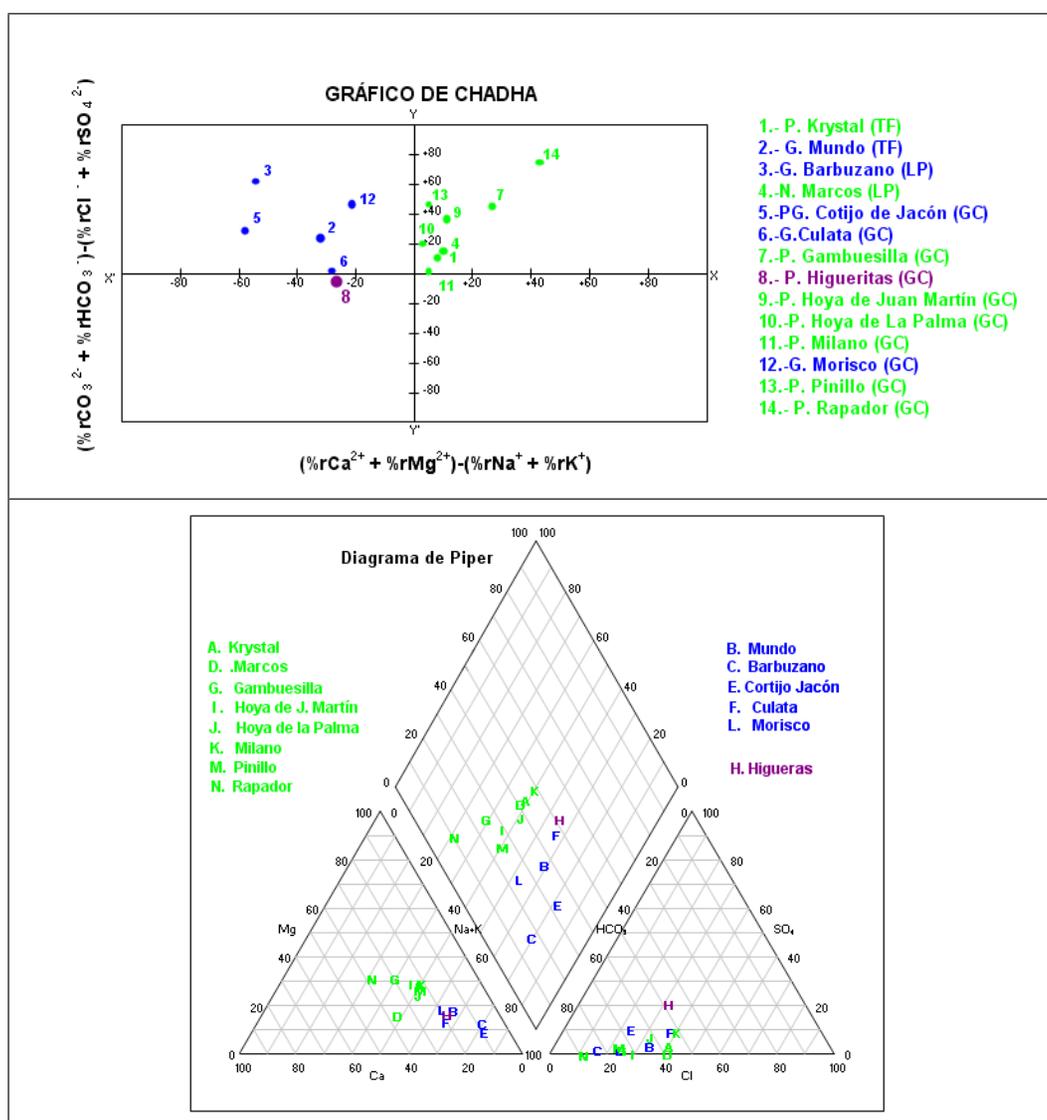
- Oligometálica / mineralización débil (50-500 mg/L): 15 captaciones (11 GC, 2 TF y 2LP).
- Mineralización media (500-1.500 mg/L): 1 captación (1 GC).

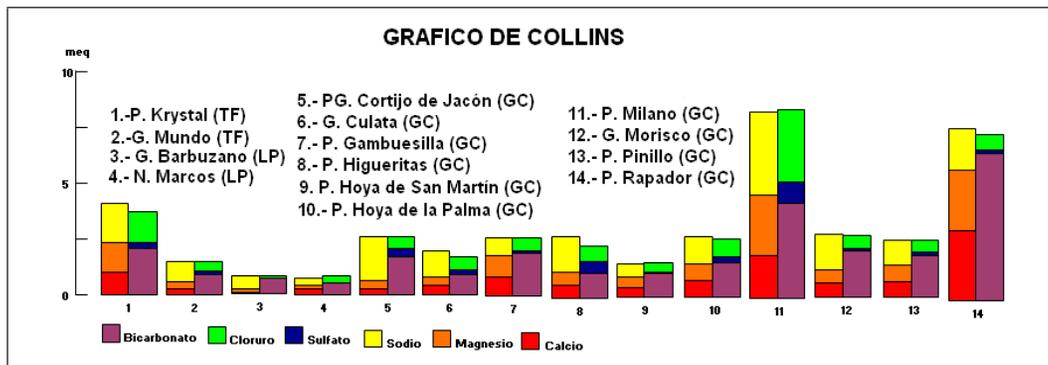
De acuerdo con la clasificación geohidroquímica de Schoeller (Custodio y Llamas, 1983), las AMN de Canarias se clasifican como:

- Aguas bicarbonatadas:

- a) **Aguas bicarbonatadas sódicas:** B.- El Mundo (TF), C.- Barbuzano (LP), E.- Cortijo de Jacón (GC), F.- Culata (GC), L.-Morisco (GC), El Molinillo (GC) y La Mina de Tejada (GC).
- b) **Aguas bicarbonatadas cálcico magnésicas:** A.- Krystal (TF), D.- N.Marcos (LP), G- Gambuesilla (GC), I.- Hoya de Juan Martín (GC), J.- Hoya de La Palma (GC), K.- Milano (GC), M.- Pinillo (GC) y N.- Rapador (GC).
- Aguas cloruradas:
- c) **Aguas cloruradas sódicas:** H.- Higuera (GC).

La representación gráfica de las diversas tipologías de las aguas subterráneas catalogadas como agua mineral natural del Archipiélago Canario se plasma en la Figura 5.





**Figura 5:** Diagramas hidroquímicos de Piper, Chadha y Collins de las AMN de Canarias (información disponible referente a 14 captaciones).

Los diagramas de Piper y Chadha indican que la mayoría de las AMN de Canarias son bicarbonatadas cálcico-magnésicas (50,00 %), seguida de las bicarbonatadas sódicas (43,75 %) y de las cloruradas sódicas (6,25 %).

Se ha comparado también las medianas de distintos parámetros y los iones mayoritarios de las AMN de Canarias con las medianas de AMN a nivel nacional (Tabla 2).

**Tabla 2;** Comparación de los valores de las medianas de la concentraciones de los iones mayoritarios y principales parámetros de AMN de Canarias con los valores a nivel nacional. Fuente: datos de Canarias (consulta de los expedientes en el Servicio de Minas, CAC); datos a nivel nacional (Gutiérrez et al., 2012). Elaboración propia.

	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/L	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> mg/L	Cl <sup>-</sup> mg/L	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/L	Na <sup>+</sup> mg/L	K <sup>+</sup> mg/L	Ca <sup>++</sup> mg/L	Mg <sup>++</sup> mg/L	SiO <sub>2</sub> mg/L	C.E. μS/cm	RS mg/L	pH
Canarias	100,9	6,9	20,5	15,0	27,1	5,3	12,5	7,0	61,2	261,5	187,0	7,81
Nacio- nal	226,0	18,2	14,0	3,4	11,5	1,3	55,7	12,6	9,3	355,0	249,0	7,98

Como se observa, en general las medianas de los valores de concentración de las AMN de Canarias presentan valores más bajos en comparación con los valores a nivel nacional. Es de destacar el caso de la sílice, casi siete veces superior en el primer caso, motivado por la presencia de abundantes especies silicatadas en la roca. La marca climática en la recarga (aridificación) en Canarias también aparece en cuanto a la concentración de ión cloruro, superior al valor nacional.

#### **4.4. Análisis de los parámetros hidrogeológicos relacionados con las captaciones de las AMN**

La estimación de parámetros hidrogeológicos para los macizos del entorno de las captaciones de las AMN se ha realizado a partir de la recopilación de los estudios que acompañan a las solicitudes de reconocimiento de agua mineral natural, que a su vez han sido recopilados a partir de ensayos de bombeo realizados durante el SPA-15 (1975) y otra información complementaria derivada de documentación específica (ITGE, 1992; DGIE, 2003; IGME, 2003; Skupien y Poncela, 2011), no existiendo suficientes datos de contraste.

Existen escasos valores fiables característicos de la transmisividad y del coeficiente de almacenamiento de los acuíferos volcánicos canarios relacionados con las AMN. Los más característicos se presentan en la Tabla 3, donde se aprecia una amplia dispersión (T entre 15 y 200 m<sup>2</sup>/día y S entre 1,5 a 7%).

**Tabla 3.-** Parámetros hidrogeológicos recopilados.

Captación	T (m <sup>2</sup> /día)	S (%)
Pozo Gambuesilla (GC)	50-200	2-5
Galería Morisco (GC)	50-200	3-5
Pozo Hoya de La Palma (GC)	50-200	2-5
Pozo Las Higueras (GC)	25-50	1,5-3,5
Naciente Marcos (LP)	15-50	2-7

Se desprende de la situación hidrogeológica de los aprovechamientos la existencia de al menos dos tipos de sistemas de flujo subterráneo relacionados con la existencia de aguas tipo mineral natural en la Comunidad Canaria:

- Sistema de flujos subsuperficiales, básicamente asimilables a acuíferos colgados, caracterizados por la existencia de sistemas de rápida circulación y renovación, de interacción rápida con el terreno por el que han circulado y baja mineralización.
- Sistema de flujos regionales, caracterizado por la existencia de sistemas de circulación profunda y lenta, y largo periodo de interacción agua-roca que dan lugar a aguas más o menos mineralizadas.

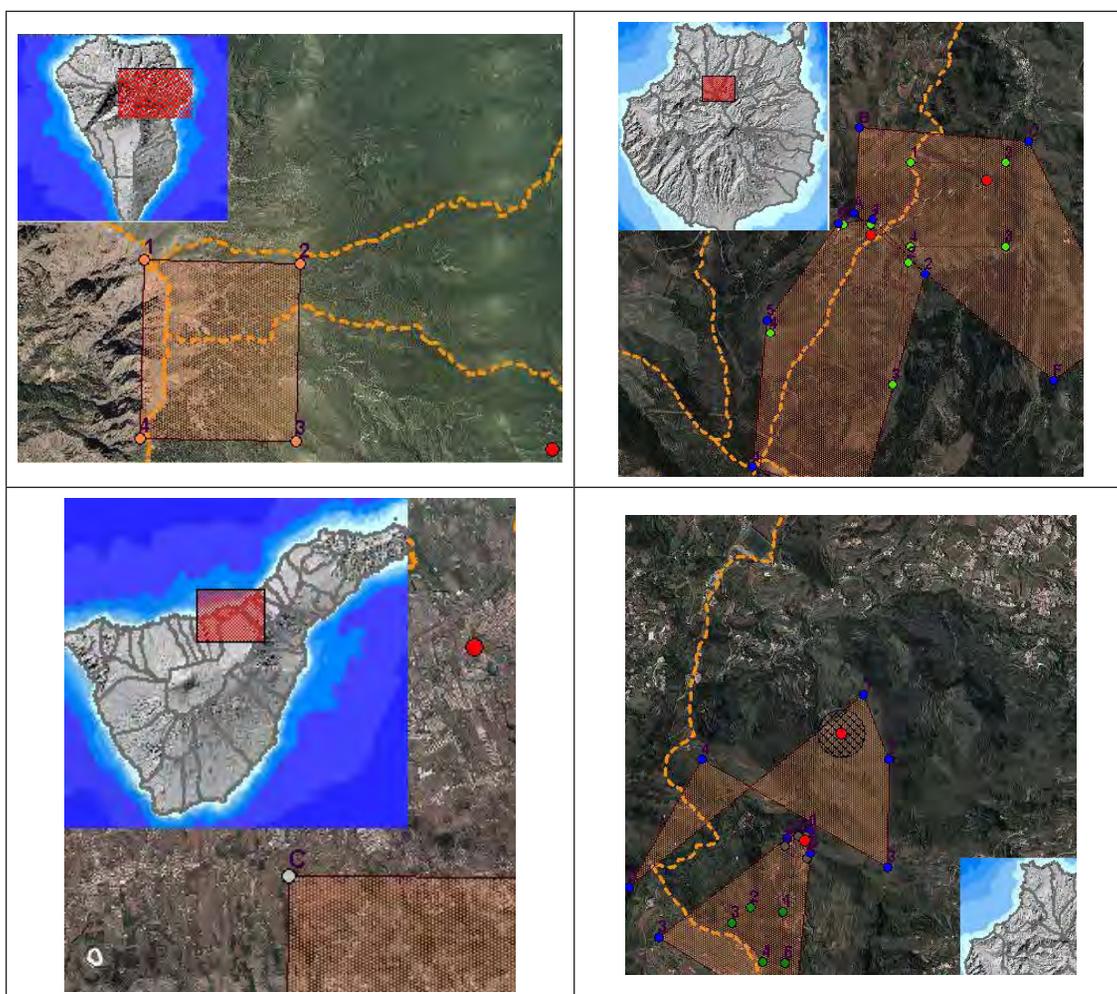
#### **4.5. Análisis de los perímetros de protección de las captaciones AMN de Canarias**

De acuerdo con la legislación vigente en la Comunidad Autónoma de Canarias, en la declaración de un agua mineral natural debe definirse un perímetro de protección para evitar

la contaminación del acuífero. En la situación actual, para el perímetro de protección se han aplicado criterios o métodos diferentes en función del autor del proyecto.

Las aguas AMN de Canarias tienen hasta 7 tipos diferentes de perímetros de protección: cualitativo, cuantitativo, calidad y cantidad, restricciones absolutas, restricciones máximas (bocamina), restricciones máximas (cata) y restricciones moderadas. En algunos casos, se han establecido en función de lo que se denomina tiempo de tránsito, que se define como el tiempo que transcurre entre la entrada de una sustancia en el seno del acuífero y su extracción por la captación.

En otros casos los perímetros son considerados como cuadrícula minera o establecidos de acuerdo con la definición propuesta por los respectivos Consejos Insulares de Aguas. En la Figura 6 se presentan algunos ejemplos de perímetros de protección de AMN en Canarias.



**Figura 6:** Perímetros de protección de algunas AMN de Canarias. (Base cartográfica: aplicación MAPA, Gobierno de Canarias).

## 5. BASE DE DATOS E INFORMATIZACIÓN

Para gestionar la información tanto administrativa como técnica, la Consejería de Empleo, Industria y Comercio del Gobierno de Canarias, a través del Servicio de Minas de la Dirección General de Industria, dispone de una aplicación con soporte Microsoft Access 2003®, compatible con otras bases disponibles, e integrada en la aplicación MAPA-SITCAN (Sistema Territorial de Información Geográfica de Canarias desarrollado por la empresa GRAFCAN). Además de las aguas minerales naturales, la base permite gestionar también las mineromedicinales y termales, todo ello mediante las correspondientes autorizaciones administrativas.

La organización de la información en dicha base de datos permite que sean visibles los datos generales de la captación en cada momento de la consulta: número de expediente, nombre y tipo de captación y denominación de la captación. El resto de la información está catalogada dentro de siete pestañas, cuya descripción se realiza seguidamente (Fig. 7):

- Localización: isla, municipio, lugar, coordenadas UTM del punto de captación (bocamina de la galería/brocal del pozo, coordenadas UTM (frente) como información a rellenar en el caso de galerías).
- Situación Administrativa: estado de la autorización de cada uno de los expedientes.
- Geohidrología: descripción geohidrológica del entorno del punto y, en su caso, detallada de los materiales atravesados.
- Perímetros de protección: información detallada del perímetro de protección de cada captación (tipo, coordenadas UTM, método de cálculo, etc.).
- Hidroquímica: datos hidroquímicos básicos acerca de las aguas minerales naturales.
- Fotografía: se deja preparado este campo para dejar abierta la posibilidad de incorporar un reportaje fotográfico.
- Planos de situación: contiene planos a escala 1:5.000 de cada captación.

Una vez alimentada la base de datos AGUAS MINERALES con todos los registros correspondientes, se puede acceder a diferentes opciones:

- “Ir a”: con un desplegable que permite de forma cómoda acceder a un determinado expediente.
- “Nuevo, Eliminar, Buscar”: opciones que facilitan la gestión de la base de datos.
- “Imprimir Ficha”: donde de forma homogénea se presenta la información de cada captación analizada.

Expedientes de Aguas Minerales

Isla:  Gran Canaria

Municipio:  Moya

Lugar:

Coord. UTM (bocamina/brocal) X:  Y:  Z:

Coord. UTM (fondo) X:  Y:  Z:

Observaciones:

Registro:  de

Figura 7: Aspecto de la interfaz.

## 6. CONCLUSIONES

El Archipiélago Canario representa aproximadamente el 6% de las marcas españolas de las AMN, siendo la séptima Comunidad en toda España. Las características de las AMN analizadas a partir de 16 aprovechamientos dispersos por terrenos volcánicos de la geografía canaria confirman su excelente calidad y presencia de elementos diferenciadores, como el contenido de silice, en comparación con las AMN nacionales.

Las diversas tipologías de las aguas subterráneas del Archipiélago Canario, catalogadas como agua mineral natural, son generalmente de mineralización débil y se clasifican en los siguientes grupos: bicarbonatadas cálcico magnésicas (50,00 %), bicarbonatadas sódicas (43,75 %) y cloruradas sódicas (6,25 %).

La información de los parámetros hidrogeológicos de los macizos del entorno de las captaciones de las AMN es escasa. Los valores promedio recopilados de transmisividad varían entre 15 y 200 m<sup>2</sup>/día, y entre 1,5 y 7% para el coeficiente de almacenamiento.

Por ello, es absolutamente necesaria la realización de estudios hidrogeológicos de detalle específicos para obtener un mejor conocimiento de los sistemas acuíferos asociados a las captaciones de las AMN. Para ello, deberían realizarse las siguientes actuaciones:

- Revisión de los perímetros de protección y características técnicas de las captaciones ya existentes y en funcionamiento.
- Definición/mejora del conocimiento de los sistemas de flujo en las captaciones de las AMN a través de diferentes herramientas hidrogeológicas de uso común (aplicación de técnicas isotópicas ambientales, parametrización hidrogeológica, etc.).
- Seguimiento y control detallado de los aprovechamientos, con datos de caudal, de calidad química, de niveles piezométricos, en su caso, todo ello orientado a evitar la sobreexplotación y hacer sostenible la captación y aprovechamiento del recurso.
- Realización de campañas sistemáticas de muestro.
- Investigación hidrogeológica para incluir nuevas captaciones en el censo de la Comunidad Autónoma de Canarias con potencial mineral natural de sus aguas.
- Se recomienda la realización de seminarios, jornadas y cursos de divulgación.

#### **REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA**

- Custodio, E. y Llamas, M.R. (1983). *Hidrología Subterránea*. Omega Ediciones, S.A. Barcelona. 2 vol. 2347 pp.
- DGIE (2003). *Guía para la elaboración de perímetros de protección de las aguas minerales y termales*. Gobierno de Canarias. Consejería de Industria y Nuevas Tecnologías. Dirección General de Industria y Energía. 102 pp.
- DGI (2008). *Caracterización hidrogeológica e hidrogeoquímica de las aguas minerales naturales de Canarias*. Gobierno de Canarias. Consejería de Empleo, Industria y Comercio. Dirección General de Industria. 64 pp + anejo de fichas.
- Gutiérrez Reguera, F.; Sejido Delgado, I.; Montoya Mayor, R.; Ternero, Rodríguez, M. (2012). *Caracterización fisicoquímica, clasificación y valoración nutritiva de las aguas minerales naturales envasadas en Andalucía*. SIAGA 2012. Publicaciones del instituto Geológico y Minero de España. Serie Hidrogeología y Aguas subterráneas (30): 259-271.
- IGME (2003). *Perímetros de protección para captaciones de agua subterránea destinada al consumo humano. Metodología y aplicación al territorio*. Autores Martínez, C. y García, Á. Serie: Hidrogeología y Aguas subterráneas, nº 10. 273 pp. Madrid.
- IGME (2009). [www.igme.es/internet/PanoramaMinero/actual/agua%202009.pdf](http://www.igme.es/internet/PanoramaMinero/actual/agua%202009.pdf).
- ITGE (1992). *Jornadas de Aguas Minerales y Mineromedicinales en España*. Colección Temas Geológico-Mineros. Madrid. 139 pp.
- SPA-15 (1975). *Estudio científico de los recursos de agua en las Islas Canarias*. SPA/69/515. Minist. Obr. Públ. Dir. Gral. Obr. Hidrául. UNESCO. Madrid-Las Palmas.

- Skupien Balon, E.; Morales González-Moro, A. y Poncela Poncela, R. (2008). Caracterización hidrogeológica e hidroquímica de las aguas minerales naturales de Canarias. En López Geta, J.A.; Loredo Pérez, J.; Fernández Ruiz, L. y Pernia Llera, J.M<sup>a</sup>. (Eds.): Investigación y gestión de los recursos del subsuelo. Libro homenaje al Profesor Fernando Pendás Fernández. Publicaciones del instituto Geológico y Minero de España. Serie Hidrogeología y Aguas subterráneas (27): 865-880. ISBN: 978-84-7840-773-6.
- Skupien Balon, E.; Poncela Poncela, R. (2011). Características hidrogeológicas, químicas e isotópicas del agua subterránea del acuífero volcánico de las vertientes en el entorno de los nacientes Marcos y Cordero (La Palma, Islas Canarias). En “El conocimiento de los recursos hídricos en Canarias cuatro décadas después del proyecto SPA-15”. Homenaje póstumo al Dr. Ingeniero D. José Sáenz de Oiza, 87-92. ISBN: 978-84-938-46-0-2.

## CARACTERIZACIÓN DEL HIDROTERMALISMO DE TENERIFE MEDIANTE EL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO

Brito del Castillo, Isora. Departament de Geodinàmica y Geofísica, Universitat de Barcelona.  
*isora.brito@gmail.com*

Pous Fàbregas, Jaume. Departament de Geodinàmica y Geofísica, Universitat de Barcelona.  
*jpous@ub.edu*

**RESUMEN:** El estudio integrado de datos geológicos, hidrogeológicos y geofísicos y la hidrodinámica del acuífero de Las Cañadas ha permitido poner en evidencia la estructura interna de la Caldera de Las Cañadas del Teide y deducir la posición de su acuífero en el área de estudio. Dentro del marco del proyecto de Caracterización de los edificios volcánicos recientes en Tenerife mediante sondeos magnetotelúricos, se ha llevado a cabo una campaña de campo en la isla de Tenerife en la que se han adquirido datos de magnetotelúrica a lo largo de un perfil NO-SE en el sector oriental de la Caldera de Las Cañadas. El modelo de resistividades eléctricas obtenido muestra una serie de cuerpos conductores sub-superficiales emplazados dentro de lo que se ha interpretado como el acuífero de Las Cañadas. El nivel freático del acuífero se ha trazado según los datos de galerías cercanas y el contacto entre el cambio de resistividades superficiales. Los cuerpos conductores se han asociado a zonas alteradas hidrotermalmente en la base del acuífero y posiblemente localizados cerca de fracturas radiales, las cuales han actuado de vías de conexión de fluidos calientes y/o gases endógenos. En la base del acuífero se ha identificado un cuerpo resistivo interpretado como el zócalo impermeable del acuífero junto con un cuerpo conductor. Dicho cuerpo se ha interpretado como una posible intrusión ígnea de pequeñas dimensiones y de escala local, añadiendo la posibilidad de una conexión con los cuerpos conductores suprayacentes aunque no detectada con el método.

### 1. INTRODUCCIÓN

La presencia de anomalías térmicas que producen hidrotermalismo en las aguas subterráneas de la isla de Tenerife, en concreto en el acuífero de Las Cañadas, son consecuencia directa de la existencia de una fuente de calor en profundidad que ha evolucionado en el tiempo. Dado el contraste de resistividades que produce este proceso unido a la presencia de un acuífero con una dinámica muy compleja y una geología poco conocida en profundidad, el uso de métodos geoelectrónicos es idóneo para este medio.

Estudios geofísicos previos realizados en la Caldera de Las Cañadas, revelan una serie de anomalías en los diferentes métodos empleados. Así pues, los trabajos de gravimetría y magnetismo (Mc Farlane y Ridley 1968; Camacho, Vieira y De Toro 1991; Araña et al. 2000; Ablay y Kearey 2000; Gottsmann et al. 2008) muestran anomalías cercanas a los bordes de la caldera, asociadas a fonolitas que rellenan un valle enterrado o una caldera de colapso. Sin embargo, una fuerte anomalía en el interior del Complejo Teide-Pico Viejo, interpretada como el producto de la combinación de materiales eruptivos evolucionados con una signifi-

cativa alteración hidrotermal es identificada también por García Yeguas (2010) en su estudio con tomografía sísmica, con una amplia extensión en profundidad.

En cuanto a los métodos eléctricos y electromagnéticos empleados en la Caldera de Las Cañadas, se han llevado a cabo varios estudios de magnetotelúrica y audiomagnetotelúrica (García et al. 1989; Pous et al. 2002; Coppo et al. 2008a; Coppo et al. 2008b) donde revelan la existencia de 2 depresiones atribuidas a Ucanca, en el sector O y a Guajara en el sector central. Ambas representarían dos acuíferos separados por los Roques de García, que actuarían de barrera hidrogeológica. En cambio, en el sector E (Diego Hernández) muestra una inclinación suave hacia el NE identificada anteriormente con perfiles geoeléctricos de autopotencial (Aubert y Kieffer 1998).

La presencia de fluidos hidrotermales calientes o sus alteraciones en el sustrato rocoso como explicación para las diferentes anomalías mencionadas, además de la existencia de fumarolas y aguas calientes drenadas en galerías cercanas a la caldera, sugieren la existencia de un sistema geotérmico en esta área.

## 2. MARCO GEOLÓGICO

La isla de Tenerife se sitúa en la parte central del Archipiélago de Canarias, siendo la más grande del conjunto y formando la tercera estructura volcánica intraplaca más alta del planeta, después de los volcanes Mauna Loa y Mauna Kea en Hawái.

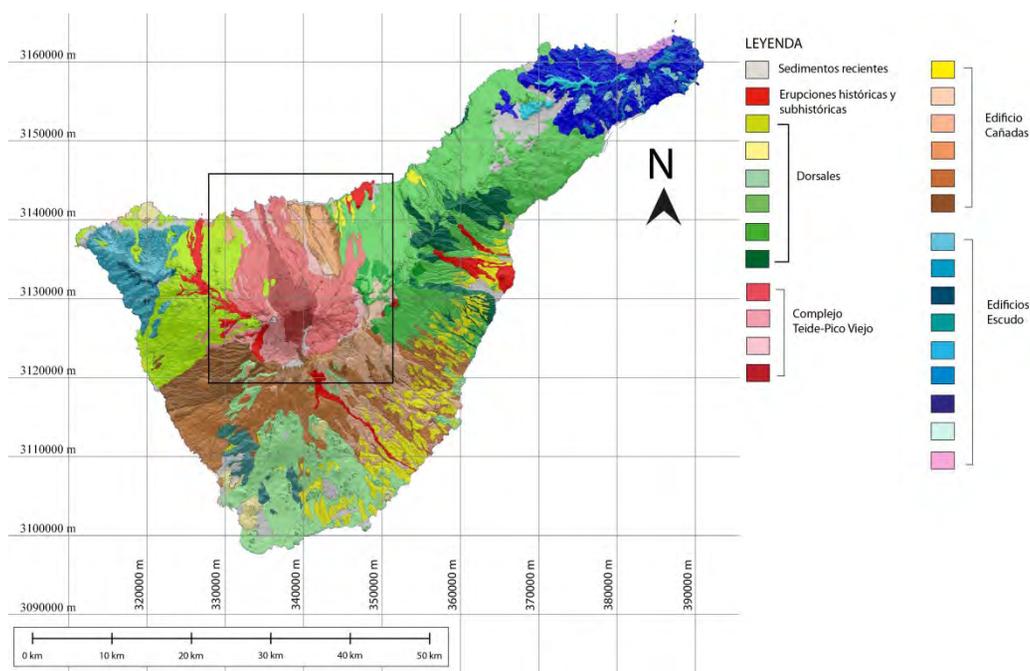
La zona central de la isla, constituida por la Caldera de Las Cañadas del Teide se comenzó a formar hace 3.3 Ma (Edgar et al. 2005), tras concluir la etapa en escudo. La fase de volcanismo central dio lugar a sucesivos y gigantes estratovolcanes, diferenciados en: Edificio Cañadas y Complejo Teide-Pico Viejo (Fig. 1).

La actividad del Edificio Cañadas va desde los 3.3 Ma hasta los 0.196 Ma (Edgar et al. 2005), representa el primer volcanismo central de Tenerife y el más importante ya que sus productos aparecen intercalados en gran parte de la isla (Fig. 1). El edificio se constituyó a partir de varios ciclos de creación-destrucción, dando lugar a 3 formaciones sucesivas en el tiempo: Formación Ucanca (1.59 – 1.18 Ma), Formación Guajara (0.85 – 0.65) y Formación Diego Hernández (0.37 – 0.17 Ma) (Martí, Mitjavila y Araña 1994). El carácter de estas formaciones viene relacionado con eventos de construcción de grandes edificios volcánicos en el centro de la isla y su posterior colapso vertical debido al vaciado de las cámaras magmáticas de los edificios y a la inestabilidad de estos para aguantar su propio peso (Fúster et al. 1968; Martí, Mitjavila y Araña 1994; Ablay y Kearey 2000; Martí y Gudmundsson 2000). Esta serie de colapsos verticales dieron lugar a la actual configuración de la Caldera de las Cañadas (Fig. 2), además de un deslizamiento lateral propiciado por la inestabilidad de la pared norte de la caldera como es el deslizamiento del Valle Icod-La Guancha hace 0.2 Ma (Ablay y Martí, 2000), quedando el Macizo de Tigaiga como relicto de esta antigua pared.

Tras el deslizamiento, debido a la descompresión sufrida por el colapso del Edificio Cañadas y por nuevos aportes de magmas profundos, se produce la reactivación de la cámara magmática en la parte central de la isla (Ablay y Martí 2000). Esto da lugar a la formación del Complejo Teide-Pico Viejo, donde sus emisiones rellenan parcialmente la caldera del Edificio Cañadas (Fig. 1), con una cada vez mayor diferenciación de sus magmas (traquibasaltos y posteriormente fonolitas).

Ya durante el Holoceno, el crecimiento del complejo y varias causas como el menor aporte de magmas o el aumento de la presión litostática, propició la migración del volcanismo a través de las fracturas radiales de las base del Complejo Teide-Pico Viejo.

El origen del valle de Icod-La Guancha ha sido el evento más estudiado ya que se encuentra directamente relacionado con la formación de la caldera de Las Cañadas. Pese a que la génesis del origen de la caldera es motivo de numerosas discusiones científicas debido a las diferentes hipótesis existentes sobre ella, la formación del valle de Icod-La Guancha mediante un deslizamiento lateral es respaldada por la comunidad científica. Dicho deslizamiento tendría como origen la inestabilidad de la pared norte del Edificio Cañadas, formándose en la base del deslizamiento una brecha caótica de matriz limo-arcillosa denominada localmente como “mortalón”, observable en varias galerías y pozos del valle (Custodio 1978; Coello y Bravo 1981; Navarro 1995).



**Figura 1:** Mapa geológico de Tenerife. El recuadro negro indica el área de estudio del presente trabajo (modificado de GRAFCAN, 2003).

### **2.1. Hidrogeología**

La isla de Tenerife se caracteriza por una extraordinaria heterogeneidad, responsable directa de la irregular distribución del agua subterránea insular (PHI 1996). El medio acuífero de Las Cañadas está albergado en los materiales del Edificio Pre-Caldera (Edificio Cañadas) que constituyen la base de la cubeta, rellena por los materiales del Complejo Teide-Pico Viejo. El comportamiento hidrogeológico de ambas formaciones es diferente ya que la elevada permeabilidad de los materiales de relleno contrasta de manera significativa con la que, en general, ofrece el edificio pre-caldera, muy compactados, alterados y de permeabilidad reducida (Navarro 1995; Farrujia et al. 2004).

La elevada porosidad y permeabilidad primaria de los materiales del Complejo Teide-Pico Viejo, unido a la topografía casi plana del área de Las Cañadas y a la inexistencia de grandes capas horizontales impermeables, favorece la rápida recarga y acumulación de elevados volúmenes de reserva de agua en esta zona (Farrujia et al. 2004). Además, en el caso de que exista un sistema volcánico-hidrotermal somero bajo el Complejo Teide-Pico Viejo, los procesos de arcillificación y la deposición de minerales secundarios en poros y fisuras unidos a la continua intrusión de diques bajo el mismo, harían que éste fuera prácticamente impermeable desde el punto de vista hidrogeológico (Navarro 1995).

La superficie freática ha sido estimada mediante los sondeos profundos ejecutados en el interior de la caldera por el CIATFE (1992-1995) y por el proyecto SPA-15 (MOPU-UNESCO 1970-1975), además de las medidas de presiones piezométricas realizadas en galerías situadas dentro de la zona III (Navarro 1995; PHI 1996). Dicha superficie en el ámbito de la caldera de Las Cañadas se encuentra a una cota absoluta de 1700-1800 m (Navarro 1995), es decir, unos 300-400 m bajo la superficie del terreno. Desde ahí, desciende con fuerte pendiente por el valle de salida de Icod-La Guancha hasta coincidir con el nivel del mar en la línea de costa. El espesor del acuífero es mayor en el anfiteatro, donde se han registrado potencias mínimas de 100 m, que en el valle de salida, donde la lámina de agua apenas se alza por encima del mortalón, que actuaría de zócalo impermeable en el valle (Navarro 1995). La circulación de agua dentro de Las Cañadas se produce en dirección cumbre – mar, es decir, se dirige hacia el Valle de Icod –La Guancha. Este paso de agua se encuentra obstaculizado por una pantalla múltiple de diques que sobreeleva la superficie freática y convierte a Las Cañadas en un gran reservorio.

## **3. ESTUDIO DE MAGNETOTELÚRICA**

### **3.1. Método magnetotelúrico**

El método magnetotelúrico (MT) es una técnica de exploración geofísica perteneciente al campo del electromagnetismo que permite obtener información de las propiedades geoeléctricas del subsuelo mediante las fluctuaciones temporales del campo electromagnético generadas en la ionosfera.

Cuando esta energía llega a la superficie, conocida como campo primario, penetra en la Tierra. Cagniard (1953) enunció la hipótesis de que el campo electromagnético llega a la superficie terrestre en forma de onda plana con incidencia vertical. De esta manera, al penetrar, la Tierra actúa de conductor, induciendo un campo eléctrico o corriente telúrica y un campo magnético secundarios.

Las componentes del campo eléctrico y magnético ( $E_x, E_y$ ) se relacionan a través del tensor de impedancia ( $Z$ ) de la siguiente manera:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix}$$

Las componentes del tensor de impedancias permiten calcular 2 magnitudes, la resistividad aparente y la fase, mediante las siguientes ecuaciones:

$$\rho_{aij} = \frac{1}{\omega \mu_0} |Z_{ij}(\omega)|^2$$

$$\phi_{ij}(\omega) = \arctg \left( \frac{\text{Im} Z_{ij}(\omega)}{\text{Re} Z_{ij}(\omega)} \right)$$

Donde  $\mu$  (henrys/metro) es la permeabilidad magnética e  $i, j$  denotan las componentes horizontales.

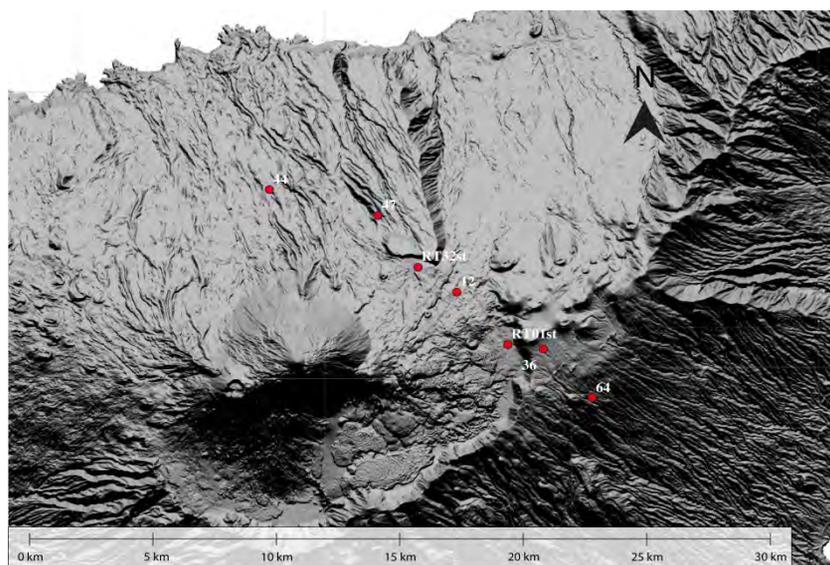
Además, la función de transferencia geomagnética o *tipper* se define como la relación lineal entre la componente vertical y las componentes horizontales del campo magnético:

$$H_z = \begin{pmatrix} T_x & T_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix}$$

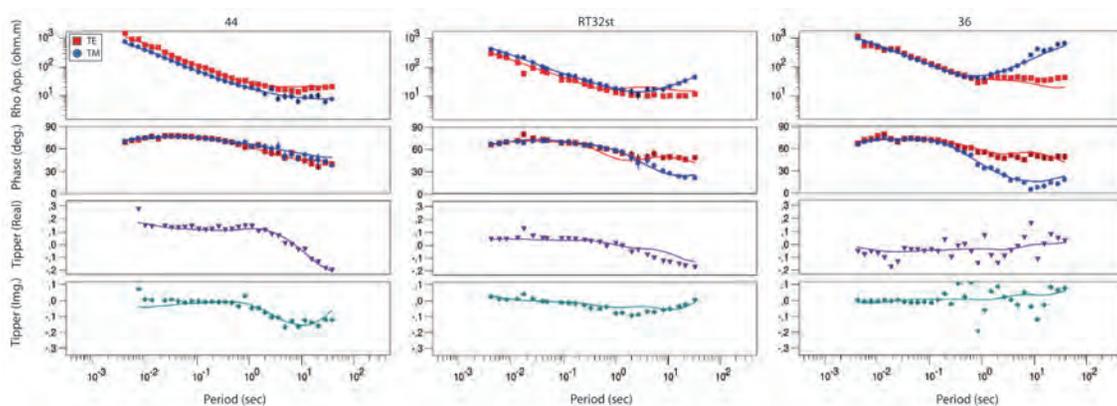
Donde  $T_x$  y  $T_y$  son magnitudes complejas.

Los datos de magnetotelúrica adquiridos en Tenerife consisten en 7 sites (Fig. 2) de entre 66 estaciones con una rango de períodos registrados desde 0.004 hasta 500 s. Éstos conforman un perfil de dirección NO-SE, situado en el extremo oriental del Parque Nacional del Teide, perpendicular a la Dorsal NE y prolongándose hasta el Valle de Icod-La Guancha, con una longitud total de 16 km. En todas las estaciones se realizaron medidas de las 4 componentes horizontales (N-S, E-O) de los campos eléctricos y magnéticos, y la componente vertical del campo magnético. Debido a la cercanía del océano, los datos de MT se ven muy influenciado por su presencia y distorsiona los resultados a causa de su gran conductividad. Con el fin de

evitar el efecto del océano, el rango de períodos invertidos ha sido de 0,025-20 s, ya que a períodos más largos el océano influye en los datos (Pous et al. 2002). Así pues, a partir de los datos recogidos se construyeron las series temporales para su posterior procesado mediante un algoritmo robusto.



**Figura 2.** Trazado del perfil adquirido en la Caldera de Las Cañadas. Los puntos rojos representan las estaciones de MT.



**Figura 3.** Curvas de resistividad aparente, fase y tipper de 3 sites del perfil (ver Fig. 2 para su identificación). Los datos han sido rotados  $-115^\circ$ . Las líneas sólidas corresponden a la respuesta del modelo en la inversión 2D-

A períodos muy pequeños (0.1 s) los datos tienen un comportamiento aproximadamente uniforme, relevando un medio cercano a 1-D (Fig. 3). En cambio, a partir de 1 s, las curvas de resistividad aparente y fase muestran un cambio de forma, revelando la existencia de una capa conductora a poca profundidad y una suprayacente resistiva. Esta estructura más compleja indicaría la presencia de un modelo 2D a poca profundidad (Fig. 3).

### **3.2. Dimensionalidad y static shift**

Con el objetivo de evaluar la dimensionalidad de la estructura geoelectrica, se llevó a cabo un análisis de ésta en la que se detectó la existencia de una dirección de strike conjunta para todas las estaciones. Para períodos de 0.01 - 10 s el *strike* resultante fue de 65 NE. Las medidas se realizaron respecto N-S, por lo que se efectuó una rotación en el tensor de impedancias de -115. Para comprobar los resultados obtenidos se representaron además los vectores de inducción para períodos de 0.1 s, 1 s y 10 s. Éstos mostraron claramente el carácter 2D predominante para los períodos largos y 1D para períodos cortos. El strike obtenido muestra la gran influencia de la dorsal NE, perpendicular al perfil.

El desplazamiento vertical de las curvas de resistividad aparente debido al efecto de la distorsión galvánica o static shift fue insignificante. Sólo exceptuando 2 sites localizados cerca de las paredes de la caldera en los que se tuvo que desplazar ya que para los períodos cortos, la resistividad aparente se encontraba por debajo del nivel medio estimado para las estaciones aledañas.

### **3.3. Inversión 2D**

Una vez procesado los datos se procedió a realizar la inversión 2D, donde se encuentran soluciones al problema inverso 2D para datos magnetotelúricos, usando el método de los gradientes no lineales conjugados. Sin embargo, antes de realizar la inversión, se calculó el nivel de error o error floor, es decir, el mínimo error posible que puede tener un dato en el proceso de la inversión y que se aplica a cada componente (resistividad aparente y fase). Siendo éste de 4% para resistividad aparente, 2% para fase y 0.02 para tipper. Además, durante la inversión, se realizó un estudio sobre los diferentes parámetros que controlan el suavizado del modelo:

- Parámetro de regularización  $\tau$ , el cual controla el grado de compensación entre los desajustes en los datos y el suavizado del modelo (Abdul Azeez et al. 2011).
- Parámetro de suavizado horizontal  $\alpha$ , primando éste sobre el suavizado vertical. De forma que, para valores altos de  $\alpha$ , las estructuras horizontales se suavizan (Wannamaker et al. 2008; Abdul Azeez et al. 2011; Spratt, Craven y Sanborn-Barrie 2012).
- Parámetro de suavizado vertical  $\beta$ , procurando un grado de uniformidad en profundidad para un valor de  $\beta=0$  (Wannamaker et al. 2007).

Se concluyó que los valores idóneos de suavizado eran  $\tau=7$ ,  $\alpha=1$  y  $\beta=1$ . Además, Se realizaron varias pruebas con el objetivo de un mejor ajuste de los datos, es decir, un RMS menor. Para ellos se invirtió el *tipper*, parte real e imaginaria, obteniéndose un RMS de 3,062. A continuación se invirtió el *tipper* y la polarización TM (resistividad aparente y fase) y se obtuvo un RMS de 2,923. Finalmente se invirtieron el *tipper* y ambas polarizaciones (TM y TE) con un RMS de 2,786. Para el modelo final se refinó la malla, con unas dimensiones de 101x96, siguiéndose el proceso anterior con un error floor fijado y siendo el RMS final de 2,31% (Fig. 4).

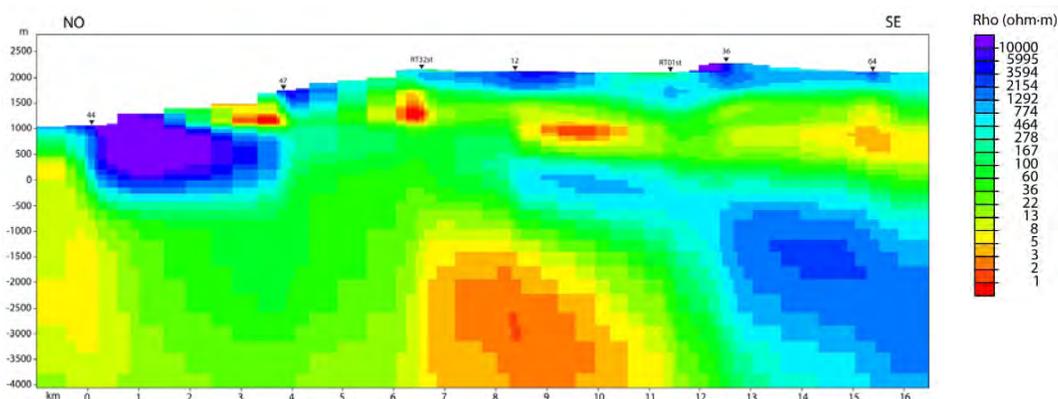


Figura 4. Modelo obtenido en la inversión 2D para los 7 sites del perfil.

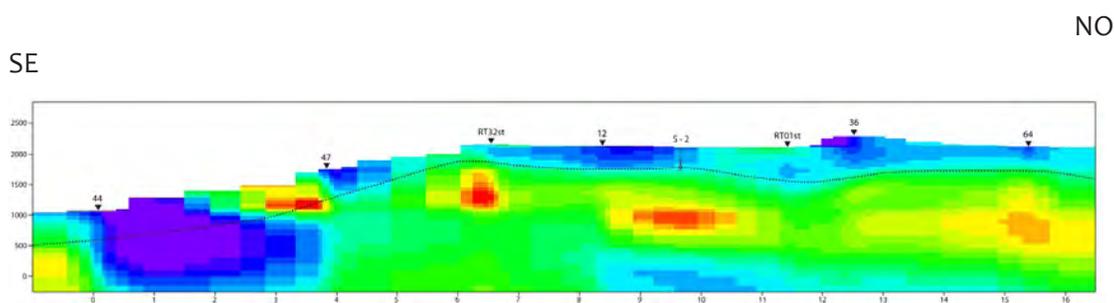
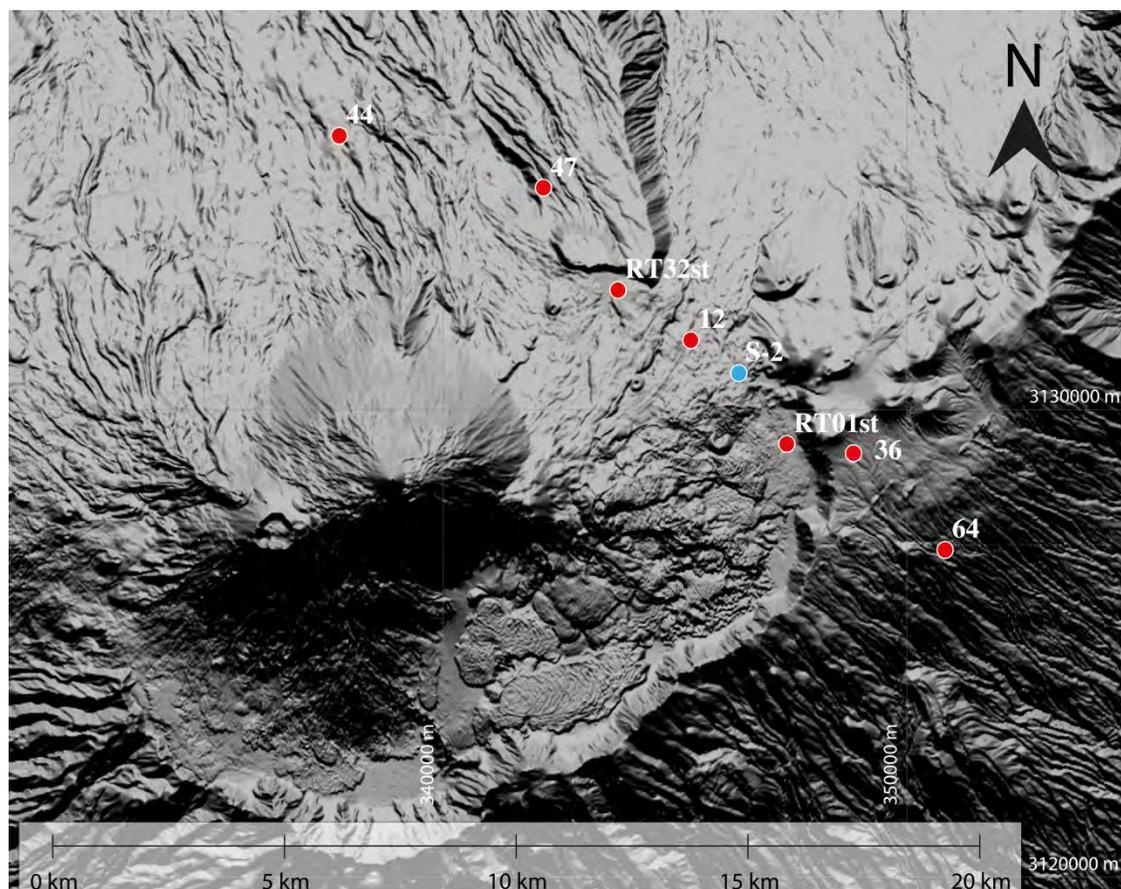
#### 4. RESULTADOS Y DISCUSION

El modelo de resistividad eléctrica obtenido (Fig. 4) se ha interpretado en base a los recursos disponibles, tanto geofísicos como geológicos e hidrogeológicos. La interpretación se ha subdividido en dos partes para una mejor comprensión.

##### 4.1. Zona superficial

Comprendida entre la cota 2200 y la cota 500 (m.s.n.m.), destaca, en primer lugar, la capa resistiva superficial, con más de  $2000 \Omega \cdot m$  y un grosor máximo de 500 m bajo la estación RT01st en el área de la Caldera de Las Cañadas mientras que, en el Valle de Icod-La Guancha, bajo la estación 44 alcanza más de 1000 m de grosor (Fig. 4). La morfología de dicha capa en la Caldera es ligeramente irregular, mostrando cierta continuidad lateral, no obstante, a su paso por el valle adquiere mayor potencia, buzando ligeramente hacia el mar. Este resistivo superficial se asocia a materiales jóvenes y permeables, correspondientes a los materiales de relleno pertenecientes al Complejo Teide-Pico Viejo y a los domos fonolíticos posteriores, extendiéndose por toda la Caldera de Las Cañadas (Pous et al. 2002; Coppo et al. 2008a). Su continuidad hacia el valle de Icod-La Guancha responde a las mismas causas ya que, tras el deslizamiento lateral que lo originó, parte de los materiales emitidos por el Complejo Teide-Pico Viejo discurrieron por el valle (Navarro 1995; Ablay y Hürlimann 2000; Ablay y

Martí 2000), teniendo una mayor potencia en la zona central del valle, donde se encuentra la estación 44, que en los extremos. Este incremento queda demostrado por la longitud de las galerías en este área, donde la mayoría tienen entre 2000-3000 m y muchas de ellas se han secado o sólo extraen agua en el frente de la galería (Navarro 1995; PHI 1996).



**Figura 5.** Situación del sondeo S-2, en azul, con respecto al perfil (arriba) y modelo con el sondeo S-2 incorporado (abajo). La línea discontinua negra del modelo indica el nivel freático interpretado. Las distancias verticales son en m, mientras que las distancias horizontales son en km.

A medida que se profundiza, los materiales son cada vez más conductores, con una resistividad media de 30-60  $\Omega \cdot m$  (Fig. 4). Su contacto con el resistivo superior es transicional y se extiende más allá de la zona superficial en profundidad, predominando en todo el perfil. Debido a sus características, esta capa se interpretó como el nivel acuífero de Las Cañadas, formado por los materiales de relleno de la anterior capa pero saturados en agua. Así pues, el contacto entre ambas capas definiría el nivel freático del acuífero. Dado que el sondeo S-2 (CIATFE 1992-1995) se emplaza dentro de la traza del perfil, se comparó el nivel freático medido con el contacto entre la capa resistiva y la conductora (Fig. 5). El nivel freático medido en el sondeo S-2 coincide aproximadamente con el contacto de ambas capas. Esto hace suponer que el contacto, al menos en el área cercana al sondeo, es fidedigna con el nivel freático. Para el resto de perfil, el contacto se comparó con el frente de galerías cercanas, suponiéndose que, como mínimo, el nivel freático se encuentra a esa cota:

- Zona SE: estaciones 64 y 36. Las cotas de los frentes de galerías más cercanos se sitúan entre 1100-1400 m para la estación 64 y entre 1500-1700 para la estación 36.
- Zona central: estaciones RT01st, 12 y RT32st. Las cotas más cercanas se sitúan a 1500 m para el RT01st, entre 1500-1700 para el 12 y entre 1400-1500 para el RT32st.
- Zona NO: estaciones 47 y 44. Las cotas más cercanas son entre 1400-1500 para el 47 y entre 500-400 m para el 44.

A partir de estos datos se puede concluir que el acuífero de Las Cañadas se encuentra sobre-elevado. En la zona SE el nivel freático va aumentando de cota, siguiendo el relieve y ajustándose al contacto entre el resistivo y el conductor. La zona central, dentro de la Caldera de Las Cañadas, es relativamente estable y alcanza su máxima altura alrededor de la estación 12, volviendo a descender suavemente hacia NO. El brusco descenso entre las estaciones 44 y 47 puede deberse al aumento del grosor de las lavas de relleno junto con el descenso del nivel freático que ha sufrido esta zona a causa de la sobreexplotación y el desnivel topográfico. Además, los materiales de relleno del valle de Icod-La Guancha alcanzan su máxima potencia en la zona central del valle, donde se emplaza la estación 44, por lo que el nivel freático se encuentra a una profundidad mayor que en los bordes del valle (Fig.5).

Dentro de esta capa conductora aparecen cuerpos aún más conductivos distribuidos a lo largo del perfil. Se caracterizan por tener una resistividad media de 2-10 y estar alineados a la misma cota aproximadamente (Fig. 4). Se atribuyen a zonas de alteración hidrotermal ya que, el origen de la baja resistividad del terreno se asocian en este tipo de ambientes a alteraciones a minerales de la arcilla (esmectita, clorita) en las rocas volcánicas. Este proceso puede deberse a la circulación, a favor de fracturas radiales, de fluidos calientes y/o gases endógenos procedentes de una fuente a mayor temperatura en profundidad (Pous et al. 2002; Coppo et al. 2008a; Merle, Barde-Cabusson y van Wyk de Vries 2010).

Los cuerpos conductivos se encuentran bajo la estación RT32st, entre las estaciones 12 y RT01st y bajo la estación 64. El conductor que se muestra bajo la estación 47 se ha descarta-

do como posible alteración hidrotermal, pese a estar alineado con los demás cuerpos, debido a su cercanía con una pendiente topográfica acentuada (Fig. 4). Esta zona marca la descarga del acuífero de Las Cañadas en el Macizo de Tígaiga. La baja resistividad en esta zona puede estar condicionada por la calidad del agua, ya que las aguas extraídas en esta zona tienen una conductividad de 1700  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Navarro 1995).

Los demás cuerpos conductivos se emplazan dentro de la Caldera de Las Cañadas, menos el que se encuentra debajo de la estación 64, en la vertiente SE de la isla. Se comprobó, con galerías cercanas, que existen anomalías térmicas en las aguas drenadas en la zona del perfil. El área más destacada se sitúa cercana a la estación 64, donde una gran cantidad de galería extraen agua con temperaturas por encima de 25, llegando a alcanzar temperaturas de 45 en la galería Herques y Amorín (CIATFE), a tan sólo 4 km hacia el NE de la estación. Además, el cuerpo conductivo se extiende hasta la estación 36, en dirección a la caldera y, pese a no disponer de galerías cercanas a dicha estación, la anomalía térmica posiblemente se prolonga hasta allí. Estudios anteriores revelan la existencia de cuerpos conductivos en el borde de la pared de la caldera asociados a la disposición de la estructura antes y después del colapso de los edificios pertenecientes al Edificio Cañadas, indicando así vías preferentes para la circulación de fluidos hidrotermales (Pous et al. 2002; Coppo et al. 2008a). Según Coppo et al. (2008a), el sector Este de la Caldera de Las Cañadas parece ser la menos afectada por procesos de alteración, indicando así una edad más joven respecto a los sectores Central y Oeste.

Los otros dos cuerpos, distribuidos bajo las estaciones RT01st-12 y RT32st se han interpretado como alteraciones hidrotermales asociadas al fuerte alineamiento estructural presente en esta zona (Fig. 4). De este modo, los diques radiales y la cercanía con la Dorsal NE actuarían de vías para la circulación de fluidos. Los cuerpos, tendrían así una dirección NE-SO pero con poca continuidad, ya que son zonas muy locales, ligadas al estado y características de estos diques.

#### **4.2. Zona profunda**

Esta zona comprende la mitad inferior del perfil, desde 500 m (s.n.m) hasta 4000 m (b.n.m) de profundidad. En ella se puede observar 2 áreas análogas entre sí, por un lado aparece un cuerpo resistivo extendiéndose bajo las estaciones 12 a 64, y por el otro, un cuerpo conductor bajo las estaciones 32 a RT01st (Fig. 4).

La capa resistiva tiene una morfología irregular, sin continuidad lateral hacia el NO y tiene una resistividad media de 2000  $\Omega\cdot\text{m}$ . Su contacto con la capa conductora superior es transicional y se sitúa a 500 m.s.n.m bajo la estación 12, buzando suavemente hacia el SO hasta alcanzar una profundidad de 500 m.b.n.m. bajo la estación 64 (Fig. 4). Esta capa se ha asociado a materiales procedentes del Edificio Cañadas e incluso Pre-Cañadas dada la profundidad. Su alta resistividad indica que no contienen agua, por lo que representarían el zócalo del acuífero de Las Cañadas.

Debido a la profundidad a la que se emplaza esta capa, ninguna de las galerías excavadas lo han penetrado, por lo que no se tiene constancia de la posición exacta del zócalo impermeable.

Este cuerpo se podría comparar con el estudio de tomografía sísmica de García Yeguas (2010). En él se identifica un área de baja velocidad que se ajusta a nuestro cuerpo, tanto en profundidad como en extensión, asociándolo a hialoclastitas y brechas eruptadas durante la fase emergente de la isla en las zonas profundas. Esta misma anomalía de baja velocidad la identifica con lavas subaéreas porosas y débiles o áreas con grandes fracturas a menor profundidad, que podrían corresponderse con los materiales superiores. La interpretación que asocia la autora a la zona donde se emplaza el cuerpo resistivo podría ser válida ya que los materiales de la fase emergente de la isla serían impermeables a causa de, entre otros factores, la edad o la compactación.

La capa conductiva, comprendida bajo las estaciones RT32st, 12 y RT01st, a una profundidad de 1 km (b.n.m), tiene una resistividad media de 2-10 (Fig. 4). Se ha interpretado como una posible intrusión ígnea de dimensiones locales ya que apenas tiene continuidad lateral en todas direcciones. El contrastes entre el cuerpo resistivo y el conductor induce a pensar en la posible edad de la intrusión ya que, pese a estar emplaza a una profundidad donde en teoría los materiales tienen una edad de 3 Ma aproximadamente, tiene unas características completamente diferentes a las de la roca encajante formada por el resistivo. El hecho de ser un cuerpo intrusivo explicaría su baja resistividad debido a los fluidos y gases contenidos en el magma que, con el tiempo, han alterado su alrededor.

En la zona de emplazamiento del cuerpo ígneo y a aproximadamente su profundidad, García Yeguas (2010) identifica una anomalía de alta velocidad que interpreta como una posible intrusión magmática enfriada o un cuerpo plutónico. No obstante, la extensión de la anomalía nombrada por la autora es de mayor tamaño y extensión, mientras que en nuestro caso hay un marcado carácter local. A falta de estudios detallados de otros métodos geofísicos, no se ha podido verificar la interpretación, pero no cabe duda de la existencia de una anomalía en el área del Portillo.

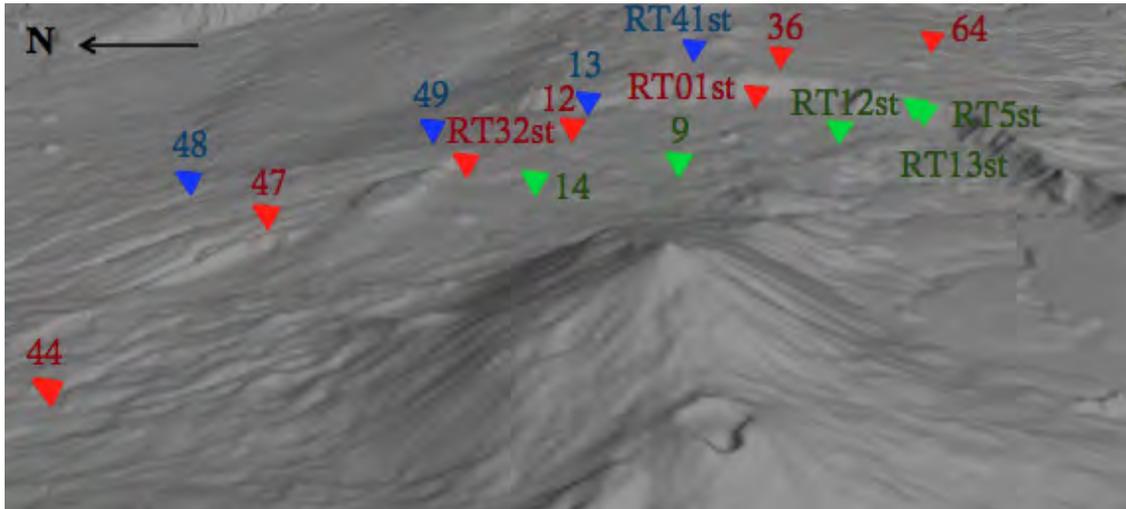
La conexión entre esta intrusión y las anomalías térmicas descritas a menor profundidad y atestiguadas por las galerías es un mera suposición. Es posible que, durante el emplazamiento de este cuerpo ígneo, se hayan creado fracturas hidráulicas que permitan una vía de comunicación con el acuífero suprayacente. Esto daría la posibilidad de explicar las concentraciones anómalas de gases y sales en las aguas drenadas por las galerías en esta zona. No obstante, y siguiendo los estudios previos, la presencia de alteraciones hidrotermales es generalizada en toda la caldera, induciendo a pensar en una posible fuente a mayor profundidad y de grandes dimensiones.

#### **4.3. Correlación con otros perfiles**

El uso de técnicas 2D restringe la posibilidad de una interpretación del medio más cuidadosa ya que, en general, la geología lleva implícita gran cantidad de cambios laterales que pueden invalidar una interpretación dada. Con el fin de tener una mayor visión del área de estudio y

una mejor comprensión de los procesos que la han afectado a lo largo del tiempo, se ha llevado a cabo una correlación entre perfiles aledaños al obtenido anteriormente.

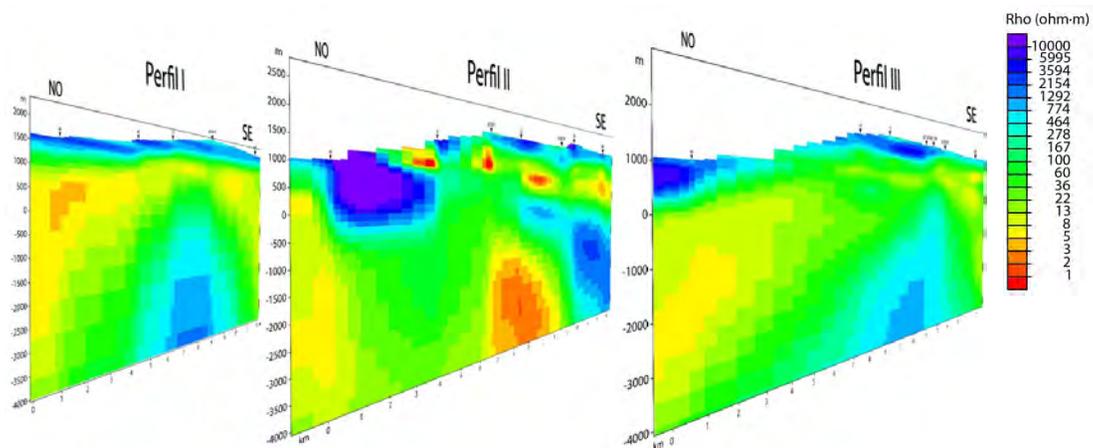
Los perfiles utilizados, perfiles I y III, han sido procesados e invertidos usando los mismos parámetros y criterios establecidos para el perfil obtenido, perfil II, por lo que se han calculado con  $\tau=7$ ,  $\alpha=1$  y  $\beta=1$ . La figura 6 muestra la sucesión de los perfiles I, II y III:



**Figura 6.** Localización de las estaciones de los perfiles utilizados para la correlación. Las estaciones del perfil I en azul, perfil II en rojo y perfil III en verde.

Pese a compartir estaciones, los resultados obtenidos muestran sus diferencias, poniéndose de manifiesto la poca continuidad lateral de algunas estructuras presentes en este área.

Se realizó una correlación de los 3 perfiles, disponiéndolos en su orden de ubicación (Fig. 7).



**Figura 7.** Correlación de los 3 perfiles.

A partir de la correlación la figura 7 muestra, en primer lugar, como los materiales resistivos superficiales ocupan toda la superficie de estudio, indicando la resistividad de la zona vadosa, a través de la cual se infiltran las aguas de recarga del acuífero. Subyacente a ésta se encuentra un área de significativo tamaño que se extiende a lo largo de todos los perfiles, atribuido al acuífero de Las Cañadas, de conductividad mayor. Su geometría se adapta en gran medida a la topografía de la zona, descendiendo suavemente hacia el Valle de Icod-La Guancha. El contacto entre el acuífero de Las Cañadas y los materiales superficiales marcarían el nivel freático, pudiéndose correlacionar perfectamente entre los 3 perfiles.

Dentro del área identificada como el acuífero se pueden distinguir claramente las zonas de conductividad mayor, predominando en el perfil II y extendiéndose lateralmente hacia los perfiles I y III. Estas zonas corresponderían a las alteraciones hidrotermales, teniendo su núcleo en el perfil II posiblemente, donde se encuentra el máximo de conductividad (Fig. 7). En la zona más profunda se aprecia como el cuerpo resistivo atribuido al zócalo impermeable, que estaría compuesto por parte del Edificio Cañadas e incluso Pre-Cañadas, se localiza en todos los perfiles. Pese a no haber estudios detallados acerca de la morfología y características de este edificio, su profundidad y propiedades resistivas, además de su envergadura, denotan un posible edificio de grandes magnitudes. Su continuidad lateral en la zona de estudio queda reflejada en el modelo y, posiblemente, al ampliar el área de estudio vuelva a aparecer a una profundidad de aproximadamente 0-500 m.b.n.m.

En cuanto al conductor profundo, éste aparece de manera aislada en el perfil II, sin continuidad lateral, siendo un cuerpo muy localizado (Fig. 7). Se ha asociado a una posible intrusión ígnea que, aunque es de carácter local, tiene una dimensiones considerables. Se hallaría emplazado dentro de los materiales resistivos profundos atribuidos al Edificio Pre-Cañadas que muy probablemente se encuentren alterados a causa del contacto con la masa ígnea pero, sobre todo, por la circulación de fluidos y gases procedentes de ella.

Los resultados hallados en el presente trabajo revelan la presencia de un cuerpo anómalo muy localizado. Ello anima a la realización de nuevos sondeos cercanos al emplazamiento del cuerpo con el fin de verificar su existencia. Los buenos resultados obtenidos mediante el uso del método magnetotélurico para la acotación del nivel freático implica el poder realizar una cartografía del acuífero de Las Cañadas, esto permitiría conocer mejor las reservas de agua que almacena.

## REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- Abdul Azeez, K.K., Satish, T., Sharana, T., and Harinarayana, A.M.D. (2011). Hydrocarbon prospects across Narmada-Tapti rift in Deccan trap, central India: Interferences from integrated interpretation of magnetotelluric and geochemical prospecting studies. *Marine and Petroleum Geology* 28: 1073-1082.
- Ablay, G.J. and Kearey, P. (2000). Gravity constraints on the structure and volcanic evolution of Tenerife, Canary Islands. *J. Geophys. Res.* 105: 5783-5796.
- Ablay, G.J. and Martí, J. (2000). Stratigraphy, structure, and volcanic evolution of the Teide-Pico Viejo formation, Tenerife, Canary Islands. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 103: 175-208.

- Araña, V., Camacho, A.G., García, A., Montesinos, F.G., Blanco, I., Vieira, R. and Felpeto, A. (2000). Internal structure of Tenerife (Canary Islands) based on gravity, aeromagnetic and volcanological data. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 103: 43-64.
- Aubert, M. and Kieffer, G. (1998). Graben sector slipping hypothesis on the northeast part of the Las Cañadas caldera (Teide, Tenerife, Spain). *C. R. Acad. Sci. Earth Planet. Sci.*, 326: 87-92.
- Cagniard, L. (1953). Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting. *Geophysics* 18: 605-635.
- Camacho, A.G., Vieira, R. and De Toro, R. (1991). Microgravimetric model of the Las Cañadas caldera (Tenerife). *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 47: 75-88.
- Canarias. Decreto 319/1996, de 23 de diciembre, por el que se aprueba el Plan Hidrológico Insular de Tenerife. *Boletín Oficial de Canarias*, de 14 de febrero de 1997, núm.21, p. 1338-1495; de 15 de febrero de 1997, núm. 22, p. 1508-1625; de 17 de febrero de 1997, núm. 23, p. 1767-1979.
- Coello, J. and Bravo, T. (1981). *Informe sobre la galería Lomo Colorado*. Informe inédito. Puerto de la Cruz: Excma. Mancomunidad Provincial Interinsular de Santa Cruz de Tenerife.
- Coppo, N., Schnegg, P., Heise, W., Falco, P. and Costa, R. (2008a). Multiple caldera collapses inferred from the shallow electrical resistivity signature of the Las Cañadas caldera, Tenerife, Canary Islands. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 170: 153-166.
- Coppo, N., Schnegg, P., Heise, W., Falco, P., Costa, R. and Bukhard, M. (2008b). Structural pattern of the western Las Cañadas caldera (Tenerife, Canary Islands) revealed by audiomagnetotellurics. *Swiss J. Geosci.* 101, 409-413.
- Custodio, E.. (1978). *Geohidrología de terrenos e islas volcánicas*. Madrid: Centro de Estudios Hidrográficos e Instituto de Hidrología.
- Edgar, C.J., Wolf, J.A., Olin, P.H., Nichols, H.J., Pittari, A., Cas, R.A.F., Reiners, P.W., Spell, T.L. and Martí, J. (2005). The late Quaternary Diego Hernández Formation, Tenerife: a cycle of repeated voluminous explosive phonolitic eruptions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 160: 59–85.
- Estudio científico de los recursos de agua en las islas Canarias (SPA/69/515)*. (1975). Madrid: Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Obras Hidráulicas.
- Farrujia, I., Velasco, J.L., Fernández, J. and Martín, M.C. (2004). *Evolución del nivel freático en la mitad oriental del acuífero de Las Cañadas del Teide*. Zaragoza: VIII Simposio de Hidrogeología de la Asociación Española de Hidrogeólogos. Zaragoza. Vol. XXVII.
- Fúster, J.M., Araña, V., Brandle, J.L., Navarro, J.M., Alonso, U. and Aparicio, A. (1968). *Geología y Volcanología de las Islas Canarias*: Tenerife. Madrid: Inst. Lucas Mallada.
- García, A., Araña, V., Astiz, M. and Ortiz, R., (1989). *Modelo MT de la región central de Tenerife. Los volcanes y la caldera del Parque Nacional del Teide*. Araña, V. y Coello, J. eds. Madrid: Publicaciones de ICONA, Serie Técnica, 7.
- García Yeguas, M.A. (2010). *Estudio de heterogeneidades laterales de volcanes activos: tomografía sísmica de alta resolución de la isla de Tenerife, anomalías de propagación de ondas sísmicas de la isla y otros efectos*. Universidad de Granada. Tesis Doctoral. Director: Jesús Miguel Ibáñez Godoy. Departamento de Física Teórica y del Cosmos.
- Gottsmann, J., Camacho, A.G., Martí, J., Wooller, L., Fernández, J., García, A. and Rymer, H. (2008). Shallow structure beneath the Central Volcanic Complex of Tenerife from new gravity data: Implications for its evolution and recent reactivation. *Phys. Earth. Planet. In.* 168: 212-230.
- MacFarlane, D.J. and Ridley, W.I. (1968). An interpretation of gravity data for Tenerife, Canary Islands. *Earth Planet. Sci. Lett.* 4: 481-486.
- Marrero, R. (2010). *Modelo hidrogeoquímico del acuífero de Las Cañadas del Teide, Tenerife, Islas Canarias*. Universitat Politècnica de Catalunya. Tesis Doctoral. Director: Nemesio Pérez Rodríguez and Dina L. López. Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartografia i Geofísica.

- Martí, J., Mitjavila, J. and Araña, V. (1994). Stratigraphy, structure and geochronology of the Las Cañadas Caldera (Tenerife, Canary Islands). *Geol. Mag.* 131: 715–727.
- Merle, O., Barde-Cabusson, S. and van Wyk de Vries, B. (2010). Hydrothermal calderas. *Bull. Volcanol.* 72: 131-147.
- Navarro, J. M.. (1995). *Geología e Hidrogeología del Parque Nacional del Teide*. [s.l]: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Subdirección General de Espacios Naturales, Parque Nacional del Teide.
- Pous, J., Heise, W., Schnegg, P., Muñoz, G., Martí, J. and Soriano, C. (2002). Magnetotelluric study of the Las Cañadas Caldera (Tenerife, Canary Islands): structural and hydrogeological implications. *Earth Planet. Sci. Lett.* 204: 249-263.
- Prospección geotérmica de la Caldera de Las Cañadas del Teide (Tenerife). Estudio Geovolcanológico. Informe Final. (1984). Madrid: Instituto Geológico y Minero de España (IGME).
- Spratt, J.E., Craven, J.A., and Sanborn-Barrie, M. (2012). Southampton Island Magnetotelluric Survey: Data Acquisition and Preliminary Analysis. Geological Survey of Canada, Open File 6988: 39.
- Wannamaker, P.E., Hasterok, D.P., Johnston, J.M., Stodt, J.A., Hall, D.B., Sodergren, T.L., Pellerin, L., Maris, V., Doerner, W.M., Groenewold, K.A., and Unsworth, M.J. (2008). Lithospheric dismemberment and magmatic processes of the Great Basin-Colorado Plateau transition, Utah, implied from magnetotellurics. *Geochemistry Geophysics Geosystem.* 9 N.5.

## ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA EL USO DE GALERÍAS DE AGUA COMO INDICADORES DEL FLUJO GEOTERMICO EN LA ISLA DE TENERIFE

Eff-Darwich Peña, Antonio Manuel. Departamento de Edafología y Geología, Universidad de La Laguna.  
*adarwich@ull.es*

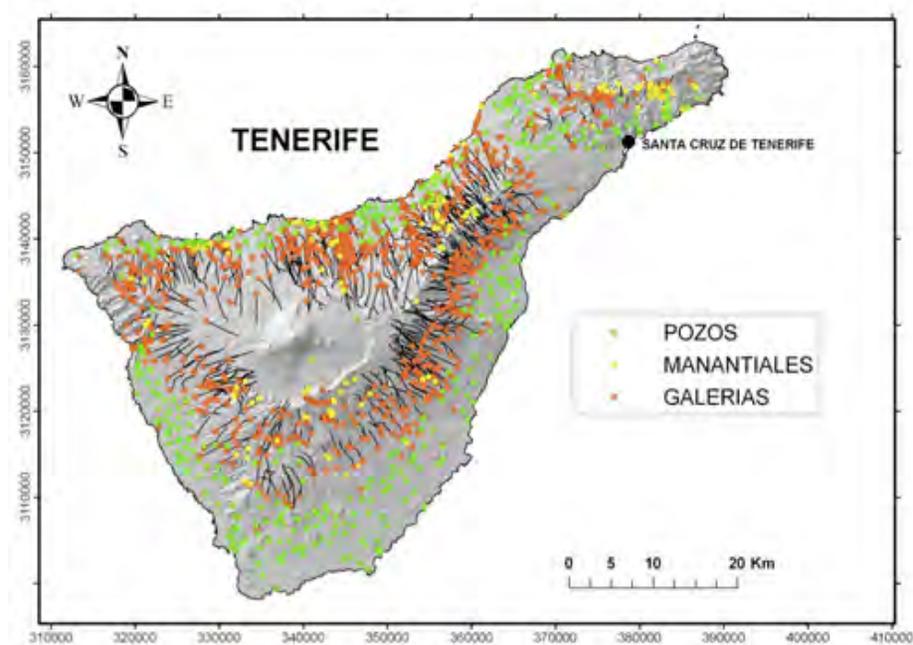
García Lorenzo, Begoña. Instituto de Astrofísica de Canarias y Departamento de Astrofísica,  
Universidad de La Laguna.  
*bgarcia@iac.es*

**RESUMEN:** En este trabajo presentamos una metodología sencilla para estudiar la estructura interna y el flujo de masas y energía en el interior de la isla de Tenerife. Proponemos usar la información geo-hidroológica obtenida de una serie de galerías de agua alineadas en dirección N-S en el valle de La Orotava, para hacer un corte vertical del terreno que pueda ser modelizado numéricamente. La comparación de los resultados del modelo y las mediciones realizadas en las galerías permiten tener una buena aproximación a los valores del flujo geotérmico en la zona occidental del valle de La Orotava, pudiendo ser unas tres veces superior al flujo promedio del planeta.

### 1. INTRODUCCIÓN

La isla de Tenerife puede considerarse uno de los mejores laboratorios hidrogeológicos del mundo. Por una parte, en la isla coexiste un amplísimo abanico de procesos volcánicos, desde aquellos asociados a materiales muy básicos a otros asociados a materiales muy diferenciados, todo ello en un área de apenas 2000 km<sup>2</sup>, algo insólito en una región volcánicamente activa y que fue una de las causas principales de otorgarle al Parque Nacional del Teide el título de Patrimonio de la Humanidad. Por otra parte, la isla cuenta con una amplísima red de galerías subterráneas y pozos (Figura 1; Mapa de galerías y pozos), que permiten estudiar desde el subsuelo prácticamente cualquier fenómeno geológico presente en la isla. Esta red de extracción de aguas subterráneas permite además acceder al acuífero a distintas alturas, latitudes y longitudes, hecho que también es insólito a nivel mundial. Las galerías y pozos constituyen el principal sistema de abastecimiento de agua para la población, por lo que existe un claro vínculo social y económico con el agua subterránea.

Una galería es un túnel prácticamente horizontal (1° de desnivel) que se excava en las laderas de la isla hasta encontrar agua subterránea, ya sea de acuíferos colgados o de los reservorios principales. Estos túneles pueden llegar a medir hasta 6 km de longitud, por lo que la longitud total de las galerías isleñas supera con creces los 1000 km. La excavación y explotación de estos recursos ha sido siempre privada, aunque el Cabildo Insular de Tenerife cuenta con un órgano administrativo y de control, el Consejo Insular de Aguas (<http://www.aguastenerife.org>).



**Figura 1;** Mapa de Tenerife donde se muestra la localización de pozos, manantiales y galerías de agua. Las trazas oscuras indican la proyección en superficie de la trayectoria subterránea de las galerías. Mapa modificado de Marrero (2008)

Pese al increíble potencial científico de las galerías, el número de investigaciones relacionadas con las aguas subterráneas es relativamente pequeño. Cabe resaltar el proyecto SPA-15, financiado en la década de los 70 por la UNESCO y que permitió catalogar y describir a grandes rasgos el acuífero insular, tanto desde el punto de vista dinámico como químico. La conexión entre el acuífero (o los acuíferos) y la geología insular fue materia de trabajo para Bravo y Coello (1976) y Coello (1976), donde se enfatiza el importante papel de los valles de deslizamiento (Orotava, Güimar, Icod) en la configuración hidrológica de la isla. Custodio (1987) realiza grandes aportaciones al conocimiento hidrogeológico de la isla, a través del estudio químico e isotópico de las aguas subterráneas, trabajo que ha continuado Marrero et al. (2008) con sus aportaciones acerca del acuífero central de Las Cañadas. El CIA ha desarrollado un modelo numérico a escala insular sobre el comportamiento dinámico de las aguas subterráneas que ha servido para elaborar los planes de actuación futuras sobre las aguas insulares. Los primeros trabajos donde se menciona el transporte de calor por las aguas subterráneas se deben otra vez a Bravo y Coello (1976) y Coello (1976), seguidos por autores como Valentín et al. (1990) y en la actualidad Eff-Darwich et al. (2008), que incluye la modelización numérica del transporte de calor y flujos en el agua subterránea del acuífero central de Las Cañadas.

Es también importante recalcar que Tenerife es una isla volcánicamente activa, por lo que el agua subterránea va a verse afectada por procesos geodinámicos internos, en particular

aquellos debidos al aporte de calor interno. El análisis sistemático de la temperatura de las aguas subterráneas es una importante herramienta para estudiar la actividad volcánica, ya que el agua puede atrapar fluidos emanados del magma, dando por ello información sobre cambios en el transporte de masas y/o calor (Tedesco, 1995; Federico et al., 2002; Anderson, 2004). En este sentido, se han encontrado cambios en la temperatura de lagos cratéricos (Hernández et al. 2008), en aguas termales (Sato et al., 1992), y en pozos y manantiales (Martín del Pozzo et al. 2002). Yamashina y Matsushima (1999) encontraron variaciones en la temperatura de las aguas subterráneas en el volcán Unzen antes de la erupción freatomagmática de Noviembre de 1990. Cabe resaltar que la conexión entre las aguas subterráneas y la geodinámica interna es poco conocida en islas volcánicas, dado el pobre registro de datos hidrológicos, como ocurre en la isla de La Reunion (Violette et al. 1997; Join et al. 2005) o Tahiti (Hildenbrand et al. 2005), en particular si es comparado con los más de 1000 puntos de muestreo que potencialmente ofrece Tenerife, a través de pozos y galerías.

En este trabajo proponemos sacar provecho de la gran densidad de galerías que existe en la isla para buscar un lugar donde una serie de galerías estén dispuestas espacialmente de modo que podamos hacer un corte vertical de una determinada sección de la isla aprovechando la información geológica e hidrológica de esos túneles. Es en ese corte vertical donde aplicaremos un modelo numérico de flujo de masas y transporte de energía que nos permita estudiar el potencial que tiene la información obtenida en galerías y pozos para caracterizar los recursos geotérmicos de Tenerife. No vamos a mostrar resultados cuantitativos, sino que nos centraremos en mostrar el potencial de la modelización numérica a la hora de comprender el funcionamiento geodinámico interno de Tenerife.

## **2. ELECCION DEL CORTE VERTICAL: MARCO GEOLOGICO E HIDROLOGICO**

Tenerife es la mayor de las Islas Canarias (2034 Km<sup>2</sup>) y una de las mayores islas oceánicas del planeta. Se localiza entre las latitudes 28-29°N y longitudes 16-17°W, a unos 280 Km de la costa del continente africano. La isla ha crecido como consecuencia de la acumulación de materiales volcánicos de muy diversa composición durante los últimos millones de años. Las unidades estratigráficas que conforman la parte emergida de Tenerife se puede desglosar en tres grupos (Figura 2; Mapa de Tenerife). El primer grupo lo conforman los Antiguos Edificios Basálticos (Anaga, Teno y Roques del Conde), entre 12 Ma a 3.3 Ma, aproximadamente (Guillou et al. 2004). El segundo grupo, el Edificio Volcánico Central (que incluye el Edificio Cañadas y el Complejo Teide-Pico Viejo), ha sido datado entre 3.5 Ma hasta la actualidad (Ancochea et al. 1999). Las estructuras más representativas del Edificio Central son un gran depresión elíptica (16x9 km<sup>2</sup>), conocida como la Caldera de Las Cañadas y, en el sector norte de la caldera, el estratovolcán Teide-Pico Viejo. Finalmente, el tercer grupo lo conforman tres dorsales basálticas (dorsales NE, NO y S), que se solapan en el tiempo con el Edificio Central. Estas dorsales convergen en el centro de la isla, donde está localizado en el estratovolcán Teide-Pico Viejo.

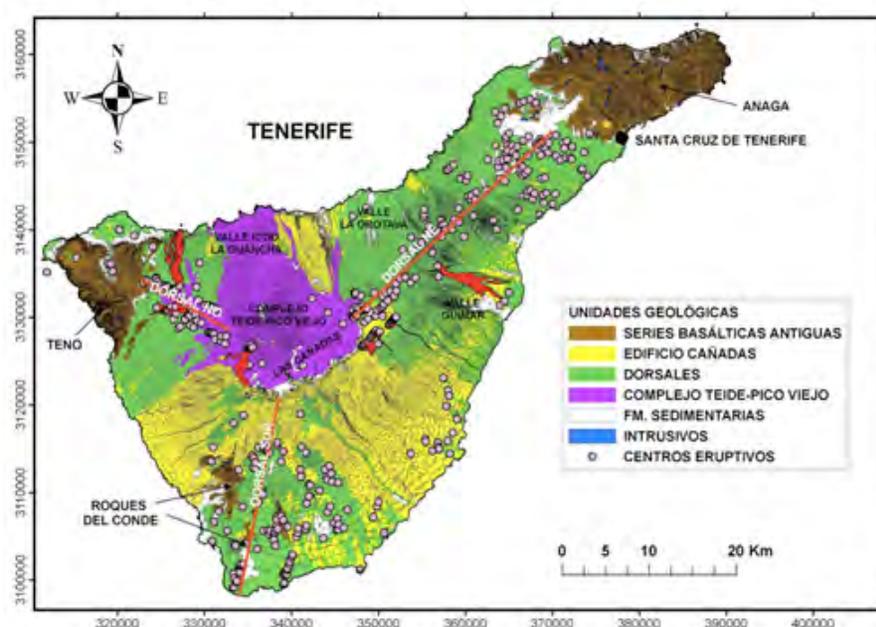


Figura 2; Mapa geológico simplificado de Tenerife. Mapa modificado de Marrero (2008).

El crecimiento de la isla no ha sido homogéneo, concentrando ocasionalmente la actividad volcánica en ciertas áreas donde ha habido un acumulación excesiva de materiales. Esta acumulación provocó inestabilidades que conllevaron el deslizamiento de enormes masas hacia el mar, formando los conocidos como depresiones o valles gravitacionales. De entre ellos, caben destacar los valles de Icod, La Orotava y Güímar (Walter et al. 2005). Una parte del Edificio Volcánico Central no colapsó durante la formación de los valles de Icod y La Orotava, conformando el actual macizo de Tígaiga. La actividad eruptiva histórica (Cabrera and Hernández-Pacheco 1987) ha consistido en seis erupciones de tipo estromboliano: Siete Fuentes (1704), Fasnia (1705), Arafo (1705), Arenas Negras (1706), Chahorra (1798) y Chinyero (1909). Las tres últimas ocurrieron en la dorsal NO, la zona más activa de la isla junto al Complejo Teide-Pico Viejo desde hace unos 50,000 años (Carracedo et al., 2003).

El comportamiento hidrológico de la isla viene dictado por los tres aspectos que definen el edificio insular, o sea, la acumulación estratigráfica de materiales, los ejes dorsales y las depresiones gravitacionales (Navarro, 1991). De esta manera, cuanto más profundo esté localizado un determinado material en la secuencia estratigráfica, más compactado y alterado estará y por ello, más impermeable. En este sentido, las permeabilidades de los materiales de los Edificios Basálticos Antiguos y el Edificio Cañadas se reducen gradualmente con la profundidad hasta que se hacen impermeables. Sin embargo, los edificios más recientes son menos compactos y están menos alterados, por lo que constituyen unidades de alta permeabilidad.

Las dorsales tiene un papel muy importante en la hidrodinámica insular. En la zona central de las dorsales, la densidad de diques es muy grande y las fracturas abiertas atenúan el efecto imper-

meabilizante que da la profundidad en la secuencia estratigráfica. De esta manera se incrementa la interconexión vertical. Los diques y fracturas se alinean paralelamente a las dorsales, facilitando el flujo longitudinal del agua subterránea, pero reduciendo el transversal. Esto provoca una super-elevación de la zona saturada y el perfil transversal del nivel freático aparece escalonado.

Los valles están formados por un basamento impermeable, producido durante el deslizamiento en masa, que se denomina Mortalón (Cantagrel et al., 1999), sobre el que se sitúan secuencia de lavas de alta permeabilidad, donde se localiza la zona saturada. El agua de lluvia infiltrada no puede ser retenida por el relleno de lavas de alta permeabilidad y circula hasta el basamento, desde donde empieza a fluir hacia el mar.

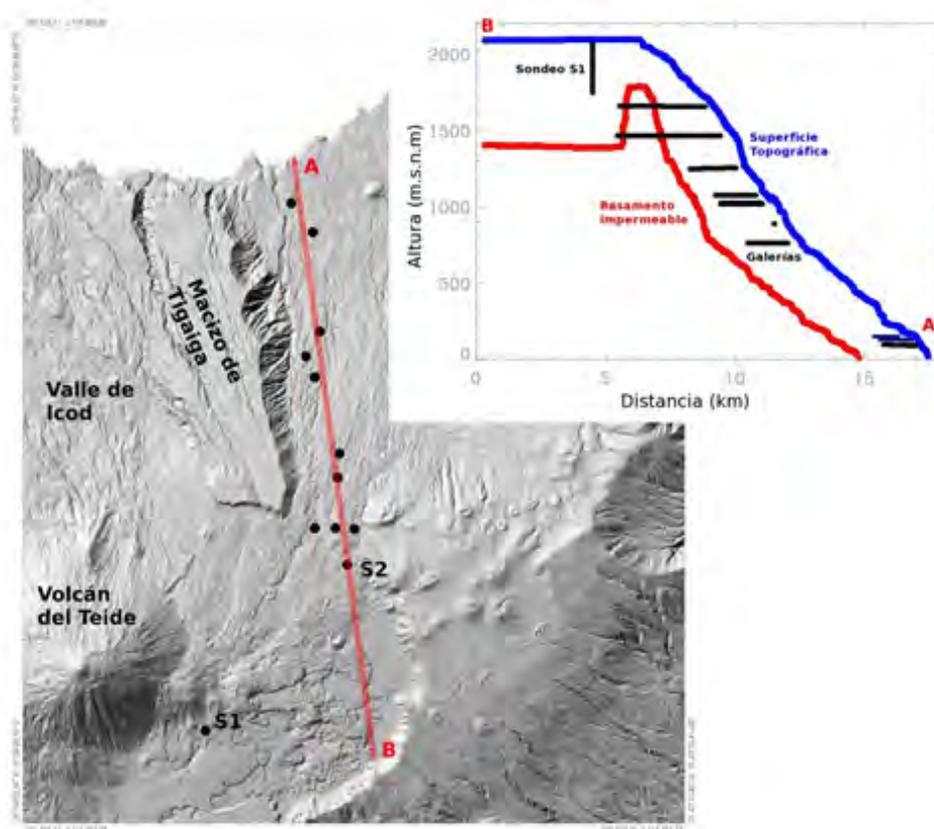
Teniendo en cuenta el marco geo-hidrológico expuesto, y los resultados obtenidos por Eff-Darwich et al. (2008), se eligió un área situada en el borde occidental del valle de La Orotava, junto la Macizo de Tigaiga (Figura 3; Mapa de Tenerife). Las temperaturas, conductividades eléctricas y composición química de las aguas obtenidas de las galerías de esta zona, no se corresponden con las del resto del valle de La Orotava, lo que sugiere un sistema relativamente aislado y alimentado desde el interior de la Caldera de Las Cañadas. Existen, además, una serie de galerías alineadas en dirección N-S que permiten hacer un corte vertical imaginario, aprovechando la información geológica recogida en esos túneles. El área de estudio seleccionada es muy interesante desde el punto de vista geológico, pues el transepto corta materiales del Edificio Cañadas, del Valle de La Orotava y de erupciones recientes asociadas al Complejo Teide-Pico Viejo. La posición del nivel freático se supone que corresponde a la localización espacial del frente de las galerías y/o el fondo de los sondeos. El basamento impermeable se ha definido por la información de la localización del mortalón recogida en galerías y por la posición de la capa conductiva eléctrica definida en Coppo et al. (2010). Cabe destacar que las dos galerías situadas a mayor altura encuentran el nivel freático a la misma profundidad, pero a alturas distintas (unos 200 m de diferencia). Esto significa que deben atravesar ambas una zona cuasi-vertical de muy baja permeabilidad (como el definido en el esquema). Es también destacable que el sondeo S2 y la galería situada a mayor altura encuentran el nivel freático a aproximadamente la misma altura. El agua extraída de ambas infraestructuras muestra, efectivamente, grandes similitudes en temperatura y composición química.

### **3. METODOLOGIA DE TRABAJO**

Una vez definido el transepto y un modelo básico del corte vertical de este transepto, será necesario volcar esta información en un modelo numérico de flujo de masas y transporte de energía. Hemos utilizado una versión modificada del software VS2DI (Hsieh, Wingle y Healy 2000). VS2DI es un modelo en diferencias finitas que resuelve la ecuación de Richard para el flujo de fluidos y la ecuación advectiva-dispersiva para el transporte energético. Este modelo analiza problemas en una y dos dimensiones, usando coordenadas cartesianas o radiales. Las relaciones entre la carga de presión, contenido en humedad y conductividad hidráulica pueden representarse usando las funciones de van Genuchten, Brooks y Corey o Haverkamp (van Genuchten 1980). Las condiciones hidráulicas iniciales se pueden definir en términos

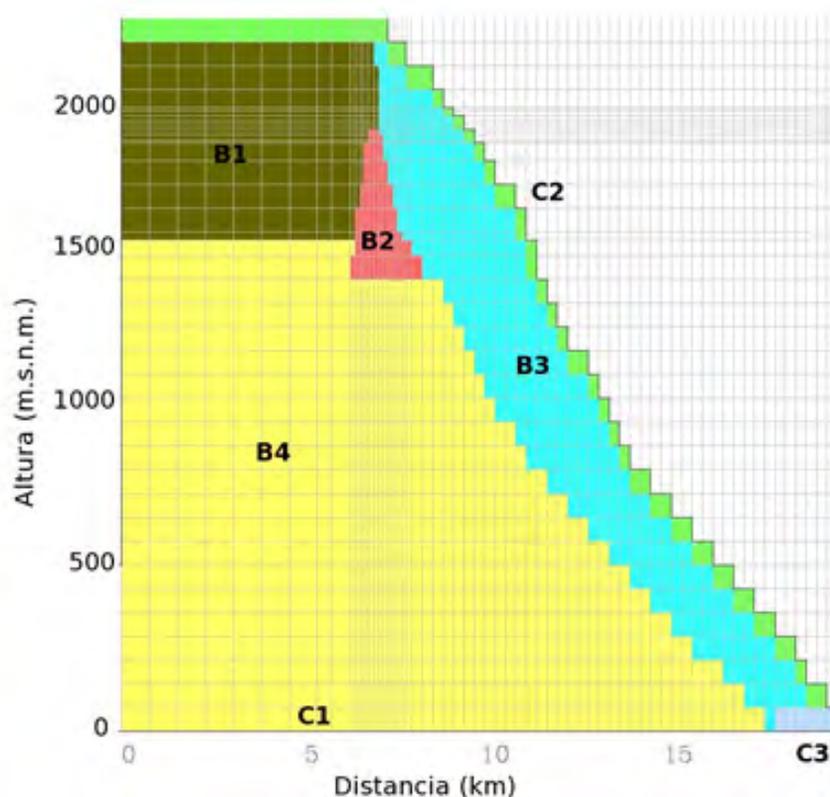
de equilibrio estático, especificando la carga de presión o el contenido en humedad. Las condiciones de contorno pueden corresponder a la tasa de infiltración, evaporación, transpiración de plantas, presión, filtración o la carga hidráulica.

El software VS2DI incluye una interfase gráfica donde se pueden definir los distintos parámetros libres del sistema de ecuaciones a resolver. El código numérico ha sido modificado de modo que se puede generar una serie de soluciones estableciendo un rango de valores para uno o varios parámetros libres del modelo. De esa manera se puede realizar un estudio de la sensibilidad del modelo. En nuestro caso, podemos estudiar como varía la distribución de temperatura y saturación del terreno en las galerías de agua del transepto N-S de la Orotava, en función de variables hidráulicas y energéticas.



**Figura 3;** Definición del transepto (A-B) donde se aplicará el modelo numérico de flujo de agua. Los puntos indican la posición (proyección en superficie) de los frentes de las galerías y/o el brocal de los sondeos (S1 y S2). El esquema insertado en la parte superior derecha muestra un corte vertical idealizado del área a estudio.

El corte vertical del área a estudio ha sido discretizado en cuatro bloques geo-hidrologicos, subdivididos a la vez por la malla definida por el modelo numerico (Figura 4; Discretización del corte vertical). Cada uno de los bloques viene definido por una serie de parámetros hidraulicos y térmicos, a los que hay que añadir las condiciones de contorno del sistema, como la infiltración, temperatura atmosférica, flujo geotérmico, etc. ... Pese a la simpleza del modelo, el número de variable a ajustar es muy grande. Es por ello por lo que se modificó el software VS2DI para poder realizar simulaciones Montecarlo y comprender de esa forma el impacto de cada parámetro en la distribución final de temperaturas y nivel de saturación del medio.

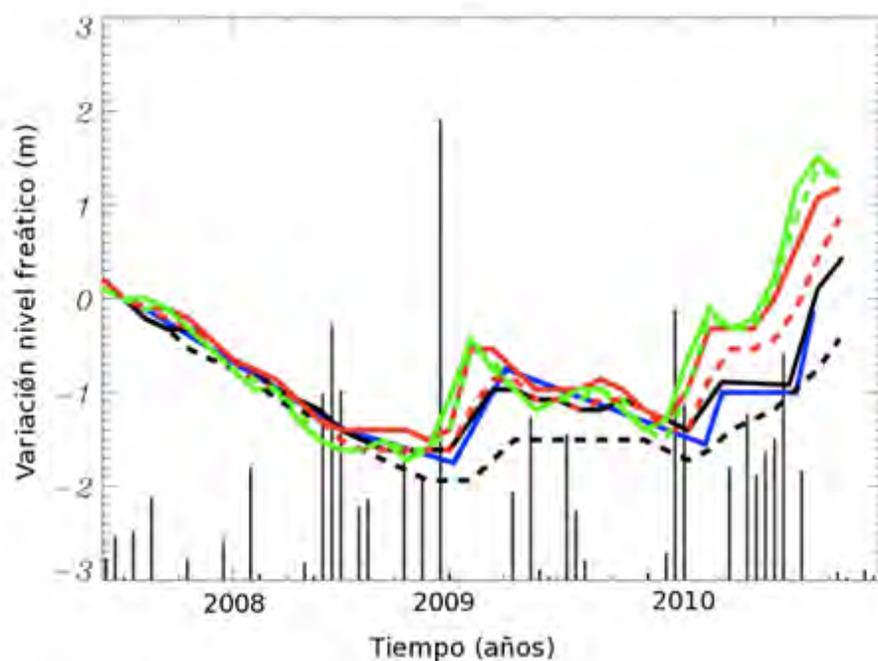


**Figura 4;** Modelo discretizado del corte vertical del área a estudio. Las líneas horizontales y verticales corresponden a la malla de integración del modelo. El bloque de color marrón (B1) corresponde a materiales del Edificio Central; el bloque de color amarillo (B4) es el basamento impermeable, el de color azul (B3) a las lavas de relleno del valle de La Orotava, mientras que el bloque de color rojo (B2) corresponde a material de permeabilidad variable, pero que geológicamente pertenece a la unidad del basamento impermeable. La fila de celda C1 define la condición de contorno para el valor de flujo geotérmico, las celdas verdes (C2) definen las condiciones de contorno de infiltración y temperatura externa y las celdas grises (C3) indican la salida de agua al mar.

#### 4. RESULTADOS

Ya hemos comentado que el modelo es bastante simple, pero incluso así contiene una enorme cantidad de parámetros libres. En esta sección vamos a presentar una serie de resultados que ilustran el potencial de la metodología que se está desarrollando.

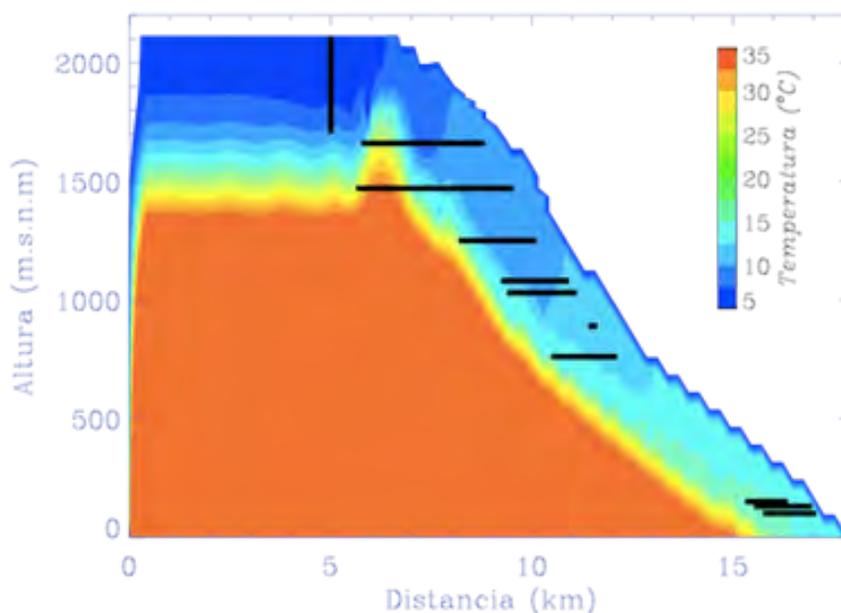
El bloque B1 del modelo numérico asociado al material del Edificio Central puede ser estudiado con mayor precisión gracias a los resultados de las mediciones continuadas que se realizan en el sondeo S1. El material que atraviesa S1 es similar al que atraviesa el sondeo S2 de nuestro corte vertical. En el sondeo S1, se está midiendo desde hace varios años la variación del nivel freático y el efecto que en él tienen las precipitaciones y las extracciones de agua (Figura 5; Variación del nivel freático). La infiltración del agua de lluvia induce un aumento del nivel freático, mientras que en épocas sin precipitaciones se observa un destacado descenso del nivel freático debido a las extracciones por galerías cercanas. El efecto de la infiltración ha servido para calcular la porosidad, conductividad hidráulica y retención de agua en este bloque del modelo. Una serie de posibles soluciones, variando los parámetros descritos fueron obtenidas. De entre todas ellas, se eligió aquella que mejor ajustaba (curva negra de la figura 5) a las variaciones reales del nivel freático (curva azul de la figura 5). Este es un ejemplo del tipo de cálculos que podemos hacer con la modificación del software VS2DI que hemos realizado.



**Figura 5;** Variación del nivel freático (curva azul) en función del tiempo para el sondeo S1. Las líneas verticales muestran el nivel mensual de precipitaciones y las líneas de otros colores corresponden a soluciones de la variación del nivel freático dadas por el modelo para distintas configuraciones de conductividad hidráulica, retención de agua y porosidades.

La distribución de la zona saturada en el corte vertical del área a estudio también se puede usar para calcular posibles valores de los parámetros hidráulicos, tal y como se hizo en la figura 5. Sin embargo, vamos a centrarnos en la utilización de los valores de temperatura que se pueden calcular en las galerías y sondeos para establecer el flujo geotérmico del área a estudio, e incluso la propia estructura interna del sistema.

Los parámetros asociados al transporte de energía del modelo (conductividad térmica, dispersión, etc. ...) están bastante bien definidos para los materiales volcánicos de las Islas Canarias, siendo las mayores incógnitas aquellas asociadas a la propia estructura interna de la isla y al valor de su flujo geotérmico. Supongamos que el flujo geotérmico en el modelo (C1) es tres veces el valor medio del planeta; introducimos como valores de contorno C2 las precipitaciones medias anuales y la temperatura promedio del suelo en el transecto N-S. Además suponemos que el bloque B2 es totalmente impermeable. Una solución típica del modelo para la configuración definida (Figura 6; Resultado del modelo numérico). Indica que la temperatura en B2 sería anormalmente alta respecto a la del material de los otros bloques. La medición real de la temperatura en las dos galerías a mayor altura del corte (por ahora inaccesibles) revelaría si la configuración del modelo es la adecuada. Sea como sea, este modelo ajusta bastante bien la temperatura del agua medida en todas las galerías y en los sondeos. Cabe destacar que la temperatura extremadamente baja (en el entorno de los 7°C) obtenida para gran parte del material del bloque B1 se encuentra en mediciones reales (Figura 7; Temperatura sondeo S2) en el sondeo S2.

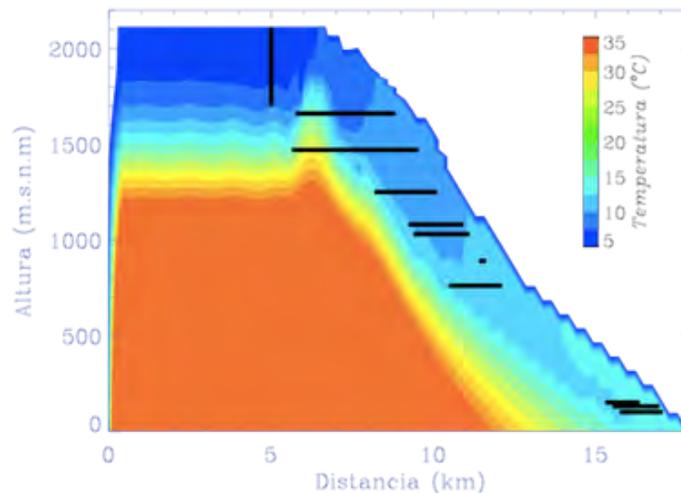


**Figura 6;** Distribución de la temperatura en el corte vertical del modelo. Las líneas oscuras horizontales y verticales corresponden al corte de las galerías y el sondeo.

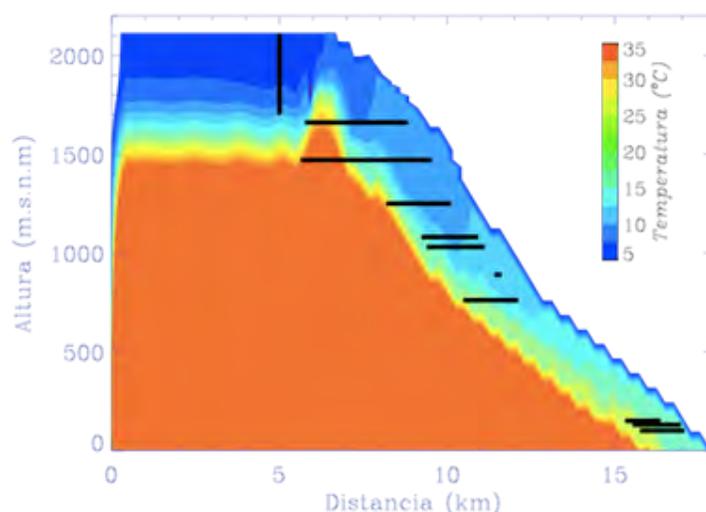


**Figura 7;** Variación en el tiempo de la temperatura en el Sondeo S2 a distintas profundidades: temperatura atmosférica en azul, temperatura a 1 metro de profundidad en negro, valores a 20 y 47 metros de profundidad en verde y rojo, respectivamente.

Supongamos ahora que el flujo geotérmico corresponde al valor medio del planeta (Figura 8; Resultado del modelo numérico). En este caso, obtenemos para las galerías y el sondeo unas temperaturas muy bajas, respecto a las medidas realmente. Este resultado es interesante, ya que demuestra que, a pesar que las temperaturas del agua subterránea no son excesivamente altas (menores de 22°C), es necesario que haya un flujo geotérmico muy elevado para compensar el efecto refrigerante del agua infiltrada. Por el contrario, si suponemos que el flujo geotérmico es seis veces el promedio del planeta, las temperaturas del corte son excesivamente altas (Figura 9; Resultado del modelo numérico).



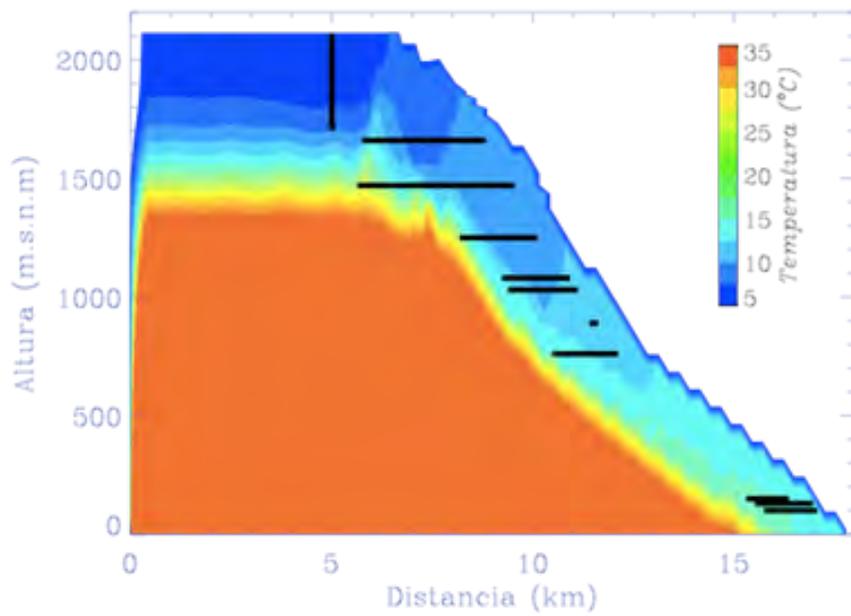
**Figura 8;** Distribución de la temperatura en el corte vertical del modelo. Las líneas oscuras horizontales y verticales corresponden al corte de las galerías y el sondeo.



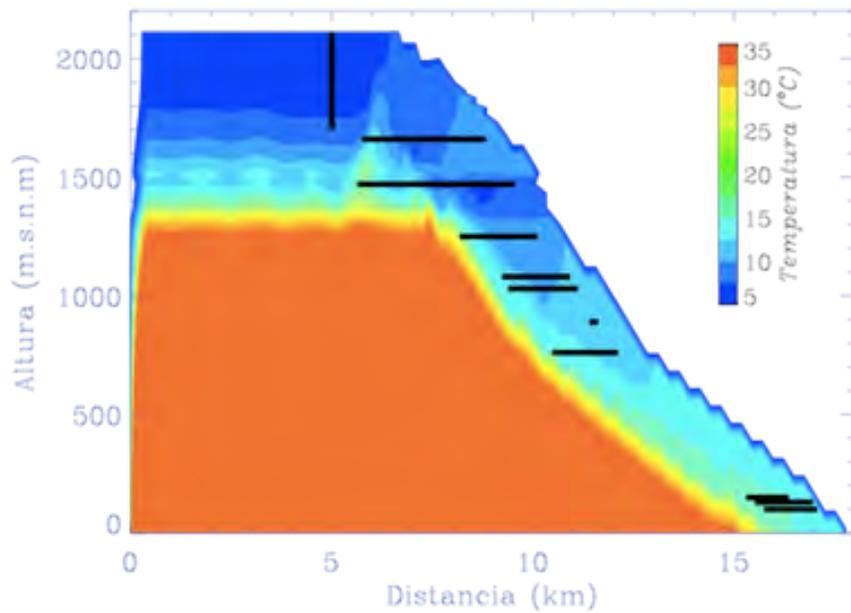
**Figura 9;** Distribución de la temperatura en el corte vertical del modelo. Las líneas oscuras horizontales y verticales corresponden al corte de las galerías y el sondeo.

Suponiendo otra vez el caso de un flujo geotérmico tres veces superior al normal (tal y como mostraba la figura 6), la anomalía térmica del bloque B2 del modelo puede reducirse significativamente, incrementando ligeramente la conductividad hidráulica de ese material (Figura 10; Resultado del modelo numérico). Aunque B2 siga siendo geológicamente parte del basamento impermeable, ese incremento de la permeabilidad podría explicarse por la presencia de fracturas o diques que incrementan ligeramente el valor promedio de la permeabilidad. Finalmente, también podemos analizar si la base del bloque B1 está o no a la altura definida en el modelo. La posición de la base de B1 tienen importantes consecuencias en lo que respecta al conocimiento de los mecanismos que producen los valles de deslizamiento y la génesis de la Caldera de Las Cañadas. Hemos simulado un caso particular que es el mostrado en la figura 10, pero localizando la base de B2, 150 metros más abajo. Como vemos, los valores de temperatura en el bloque B1 son más bajos de los medidos en la realidad. Esto se podría solucionar incrementando el flujo geotérmico, pero en ese caso, se incrementaría muy por encima de los valores medidos, las temperaturas en el bloque B3.

En definitiva, la medición de temperaturas en el interior de un corte vertical como el usado en este trabajo y la utilización de un modelo numérico son herramientas muy útiles a la hora de comprender el funcionamiento interno de una isla volcánica como es Tenerife.



**Figura 10;** Distribución de la temperatura en el corte vertical del modelo. Las líneas oscuras horizontales y verticales corresponden al corte de las galerías y el sondeo.



**Figura 11;** Distribución de la temperatura en el corte vertical del modelo. Las líneas oscuras horizontales y verticales corresponden al corte de las galerías y el sondeo.

**REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA**

- Ancochea, E.; Huertas, M.J.; Cantagrel, J.M.; Coello, J.; Fúster, J.M.; Arnaud, N and Ibarrola, E. 1999. Evolution of the Cañadas edifice and its implications for the origin of the Cañadas Caldera (Tenerife, Canary Islands). *J. Volcanol. Geoth. Res.* 88, 177-199.
- Anderson. P. 2004. Heat as a groundwater tracer, *Ground Water*, 43, 951-968.
- Bravo, T.; Coello, J. y Bravo, J. 1976. Áreas de emanaciones gaseosas y anomalías térmicas en la provincia de Santa Cruz de Tenerife (Islas Canarias). II Asamb. Nac. Geod. Geof. 2235-2244.
- Cantagrel, J.M.; Arnaud, N.O.; Ancochea, E.; Fúster, J.M. y Huertas, M.J. 1999. Repeated debris avalanches on Tenerife and genesis of Las Cañadas caldera wall (Canary Islands). *Geology* 27, 739-742.
- Carracedo, J.C.; Paterne, M.; Guillou, H.; Pérez Torrado, F.J.; Paris, R.; Rodríguez Badiola, E. y Hansen, A. 2003. Dataciones radiométricas (14C y K/Ar) del Teide y del rift noroeste, Tenerife, Islas Canarias. *Estudios Geol.* 59, 15-29.
- Coello, J. 1976. Las series volcánicas en subsuelos de Tenerife. *Estudios Geol.* 29: 491-512.
- Coppo, N.; Schnegg, P.A.; Falco, P.; Costa, N. 2010. Conductive structures around Las Cañadas caldera, Tenerife (Canary Islands, Spain): A structural control. *Geological Acta* 8: 67-82
- Custodio, E., 1987. Hydrogeochemistry of Tenerife Island, in *Simposio Canarias 2000*, Tenerife, Spain.
- Eff-Darwich, A.; Coello J.; Vinas R.; Soler V.; Martín-Luis M.; Farrujia I.; Quesada M.; y Nuez J. 2008. Underground Temperature Measurements as a Tool for Volcanic Activity Monitoring in the Island of Tenerife, Canary Islands. *PAGEOPH*, Vol. 165, No. 1, pp. 135-145.
- Federico, C., A.; Aiuppa, P.; Allard, S.; Bellomo, P.; Jean-Baptiste, F.; Parello, M. Valenza 2002. Magma-derived gas influx and water-rock interactions in the volcanic aquifer of Mt. Vesuvius, Italy, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 66, 963-981.
- Guillou, H.; Carracedo, J.C.; Paris, R. y Pérez Torrado, F.J. 2004. Implications for the early shield-stage evolution of Tenerife from K/Ar ages and magnetic stratigraphy. *Earth Planet. Sci. Lett.* 222, 599-614.
- Hernández P.; Pérez N.; Varekamp, J.; Henríquez, B.; Hernández, A.; Barrancos J.; Padrón, E.; Calvo, D. y Melean G. 2007. Crater Lake Temperature Changes of the 2005 Eruption of Santa Ana Volcano, El Salvador, Central America. *PAGEOPH*, Vol. 164, No. 12, pp. 2507-2522.
- Hsieh, P.A.; Wangle, W.; Healy, R.W. 2000. VS2DI--A graphical software package for simulating fluid flow and solute or energy transport in variably saturated porous media: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4130, 16 p
- Hildebrand, A.; Marlin, C.; Conroy, A.; Gillette, P.; Filly, A.; Assault, M. 2005. Isotopic approach of rainfall and groundwater circulation in the volcanic structure of Tahiti-Nui (French Polynesia), *Journal of Hydrology*, 302, 187
- Join, J.; Folio, J. y Robin au, B. 2005. Aquifers and groundwater within active volcanic shields, Evolution of conceptual models in Piton de la Fournaise volcano, *Journal of volcanology and Geothermal Research*, 147, 187.
- Marrero R.; López D.; Hernández P. y Pérez N. 2008. Carbon Dioxide Discharged through the Las Canadas Aquifer, Tenerife, Canary Islands. *PAGEOPH*, Vol. 165, No. 1, pp. 147-172.
- Martin-Del Pozzo, A.L.; Aceves, F.; Espinasa, R.; Aguayo, A.; Inguaggiato, S.; Morales, P.; Cienfuegos, E.; 2002. Influence of volcanic activity on spring water chemistry at Popocatepetl Volcano, Mexico, *Chem. Geol.*, 190, 207
- Navarro, J.M. 1991. Plan Hidrológico de Tenerife. Cabildo Insular de Tenerife.

- Sato, T.; Wakita, H.; Notsu, K. y Igarashi, G. 1992. Anomalous hot spring water changes: Possible precursors of the 1989 volcanic eruption off the east coast of the Izu Peninsula. *Geochem. J.* 26, 73-83.
- Tedesco, D., 1995. Monitoring fluids and gases at active volcanoes, *Monitoring active volcanoes* (Eds: McGuire, B., Kilburn, C., and Murray, J.) (UCL, London) pp. 315-345.
- Valentín, A.; Albert-Beltrán, J.F.; Díez, J.L. 1990. Geochemical and geothermal constraints on magma bodies associated with historic activity, Tenerife. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 44: 251-264.
- van Genuchten, m. Th., 1980, A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils: *Soil Science Society of America Proceedings*, v. 44, no. 5, p. 892-898.
- Violette, S.; Ledoux, E.; Goblet, P.; Carbonnel, J.P. 1997. Hydrologic and thermal modelling of an active volcano: the "Piton de la Fournaise", Reunion Island. *Journal of Hydrology* 191, n° 1-4, 37-63.
- Walter, T.R.; Troll, V.R.; Cailleau, B.; Belousov, A.; Schmincke, H.U.; Amelung, F. y v.d. Bogaard, P. 2005. Rift zone reorganization through flank instability in ocean island volcanoes: an example from Tenerife, Canary Islands. *Bull. Volcanol.* 67, 281-291.
- Yamashina, K. y Matsushima, T. 1999. Ground temperature change observed at Unzen Volcano associated with the 1990–1995 eruption. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 89, 65-71.

# **PARTE 2**

## Obras hidráulicas y Aprovechamientos **superficiales**



## EL AGUA EN LOS TERRENOS VOLCÁNICOS; FUNDAMENTO Y TECNOLOGÍAS DE APROVECHAMIENTO

Santamarta Cereza, Juan Carlos. ETS Ingeniería Civil e Industrial. Universidad de La Laguna.  
*jcsanta@ull.es*

Rodríguez Martín, Jesica. Jefa Oficina Técnica SATOCAN SA.  
*jrodriguez@satocan.com*

**RESUMEN:** El estudio integrado de datos geológicos, hidrogeológicos y geofísicos y la hidrodinámica del acuífero de Las Cañadas ha permitido poner en evidencia la estructura interna de la Caldera de Las Cañadas del Teide y deducir la posición de su acuífero en el área de estudio. Dentro del marco del proyecto de Caracterización de los edificios volcánicos recientes en Tenerife mediante sondeos magnetotelúricos, se ha llevado a cabo una campaña de campo en la isla de Tenerife en la que se han adquirido datos de magnetotelúrica a lo largo de un perfil NO-SE en el sector oriental de la Caldera de Las Cañadas. El modelo de resistividades eléctricas obtenido muestra una serie de cuerpos conductores sub-superficiales emplazados dentro de lo que se ha interpretado como el acuífero de Las Cañadas. El nivel freático del acuífero se ha trazado según los datos de galerías cercanas y el contacto entre el cambio de resistividades superficiales. Los cuerpos conductores se han asociado a zonas alteradas hidrotermalmente en la base del acuífero y posiblemente localizados cerca de fracturas radiales, las cuales han actuado de vías de conexión de fluidos calientes y/o gases endógenos. En la base del acuífero se ha identificado un cuerpo resistivo interpretado como el zócalo impermeable del acuífero junto con un cuerpo conductor. Dicho cuerpo se ha interpretado como una posible intrusión ígnea de pequeñas dimensiones y de escala local, añadiendo la posibilidad de una conexión con los cuerpos conductores suprayacentes aunque no detectada con el método.

### 1. INTRODUCCIÓN

Las obras hidráulicas en los terrenos e islas volcánicas son muy complejas de diseñar y de ejecutar; las islas presentan en general unos relieves importantes y sobre todo en la mayoría de los terrenos presentan mucha permeabilidad ( en función de la edad y tipo de los materiales que componen la zona de estudio) esto supone que una gran parte de la precipitación penetra en el terreno en forma de infiltración, por lo tanto, los mayores aprovechamientos serán los subterráneos en forma de pozos, sondeos y galerías o minas de agua , en islas con suficiente precipitación y recarga.

Por otro lado la demanda de agua en las islas se ha incrementado a lo largo de los años, principalmente debido a; una sobrepoblación del recurso hídrico, turismo masivo y un sector agrícola que en la mayoría de las islas es el mayor consumidor del recurso, llegando incluso al 80% de los mismos. En el presente documento se hace referencia a las obras hidráulicas en las islas Canarias, no obstante, el archipiélago, es un ejemplo mundial en la planificación, gestión y aprovechamiento de los recursos hídricos, por lo que la mayoría de las estrategias

hidráulicas tratadas se pueden extrapolar a otros sistemas insulares volcánicos como por ejemplo; Hawái, Galápagos, Jeju, Fidji etc....

Por otro lado; el pasado y el presente de las obras hidráulicas en las islas volcánicas de las Islas Canarias no podría explicarse de forma completa sin una aproximación a la cultura del agua desarrollada en este archipiélago, que a pesar de la heterogeneidad de sus siete territorios ha sabido conjugar el conocimiento popular, la investigación científica y la aplicación de muy diversas técnicas que aseguraron desde sus orígenes el acceso de sus pobladores a tan preciado y escaso recurso.

Haciendo referencia a la historia de las islas; la sociedad aborígen desarrollaba sencillas obras hidráulicas, tenían relativamente satisfecha la disponibilidad del recurso hídrico, salvo en la isla de El Hierro (no había cauces con agua de forma continua), los habitantes de las islas, simplemente con acercarse a los numerosos barrancos, por los cuales discurrían pequeños cursos de agua que brotaban procedentes de los manantiales satisfacían sus demandas; posteriormente tras la colonización europea, se fue generando una nueva, compleja e interesante infraestructura hidráulica, hasta que se alcanza una mayor profusión con el cambio económico que se produce -entre finales del siglo XIX y mediados del XX- con el desarrollo comercial y portuario del librecambio, sobre todo con los cultivos de tomates y plátanos; Incluso, la localización de un núcleo urbano era condicionada por la presencia de una fuente de agua, esta podía ser un barranco donde corriera el agua de una manera constante o un manantial, los grandes caseríos de medianías que no cumplían esta condición se dotaban de aljibes para su autoabastecimiento. Finalmente a los recursos satisfechos por obras hidráulicas se incorporan las tecnologías de la desalación de agua de mar y salobres y por último la reutilización de aguas.

La hidrología, el aprovechamiento y captación del agua con sus más variados ingenios y arquitecturas en el archipiélago canario es única, singular y eficiente; todo ello fruto de un estudio profundo de la hidrogeología y de los factores ambientales de las Islas, así como por la importación y a su vez desarrollo tecnológico de maquinarias e ingenios hidráulicos, en especial a lo largo de los últimos 130 años.

Como se ha comentado, Canarias tiene las similitudes de lo que ocurre en otros sistemas insulares volcánicos, como por ejemplo en Madeira, Azores, o incluso el archipiélago de Hawái. El funcionamiento de sus niveles hidrogeológicos es similar en estas islas volcánicas a Canarias aunque el aprovechamiento del recurso hídrico, por las condiciones climáticas mucho más húmedas de dichos archipiélagos, no genera un desarrollo parecido aunque se pueden presentar algunas estrategias comunes.

Los recursos hídricos canarios y la forma de obtenerlos conllevan técnicas, muchas veces únicas, usadas desde hace siglos, perfeccionadas hasta nuestros días y exportables a otros sistemas insulares volcánicos mediante el proceso denominado *transferencia tecnológica*.

## 2. HIDROGEOLOGÍA DE TERRENOS VOLCÁNICOS

Para poder acometer una obra hidráulica en una isla volcánica es fundamental conocer la geología y el proceso de formación de la isla, ya que esta última, condiciona notablemente los diferentes aprovechamientos de los recursos hídricos que se pueden llevar a cabo. Por un lado, están los materiales volcánicos que se estructuran en secuencias de emisiones lávicas, así como de depósitos piroclásticos de composición muy variable. Todas las islas del archipiélago, pasan, durante su formación, por unas etapas similares a lo largo de su historia y que se reflejan en una serie de grandes unidades volcanoestratigráficas, comunes en todas las islas; si bien, el desarrollo de cada una de ellas se produce en tiempos diferentes en las distintas islas. Estas unidades son dos: 1) Complejo Basal; los edificios insulares canarios se elevan desde los fondos marinos, por lo que solo una pequeña parte de ellos es visible sobre el nivel del mar. Una parte puede aparecer en superficie, se denomina complejo basal o basamento de la isla, se considera impermeable, son terrenos interesantes para planificar embalses, como así ha ocurrido en La Gomera y 2) Series volcánicas subaéreas, esta estructura cuanto más antigua más impermeable, se suelen nombrar por series (I,II,III...).



**Figura 1;** Fisura con agua en basalto compacto, el agua transcurre por gravedad de cotas elevadas hacia las de menor altitud, en ese camino discurre por diversos materiales, unos impermeables como los paleosuelos, diques ... y otros más permeables como las escorias de las coladas, las fisuras . El buzamiento de las coladas es muy importante también a la hora de condicionar los movimientos del agua en un terreno volcánico.

El origen volcánico de las islas y la edad geológica influyen, por otra parte, en la permeabilidad del terreno. La porosidad de las rocas volcánicas varía mucho según su origen y proceso de solidificación. Las islas más jóvenes tendrán por lo general, mayor permeabilidad, lo que implica mayor infiltración y mayores recursos subterráneos, luego este factor, condiciona la planificación hidráulica, hacia una gestión del recurso subterráneo, mediante pozos y galerías, aunque en este caso puede aparecer la contaminación de los acuíferos debido a la actividad volcánica de la isla debido a su juventud, como se ha observado en la isla de El Hierro (1,2 Ma los materiales más antiguos). En algunas ocasiones existe un apilamiento de materiales que van desde los muy compactos hasta los que presentan una porosidad que puede superar el 50%, desde los que tienen las cavidades totalmente conectadas hasta aquellos que, aún pudiendo ser muy porosos, tienen sus poros aislados unos de otros; desde los que no presentan grietas hasta aquellos que poseen un elevado índice de cavidades debidas a la fisuración. Así, los pozos en rocas volcánicas a veces pueden dar caudales espectaculares con pequeños descensos del nivel, pero en la misma formación y a escasa distancia pueden ser prácticamente estériles (Custodio, 1978; Custodio y Llamas, 1976).

En la formación de las islas, principalmente debido a el *buzamiento* de las coladas, se condiciona el movimiento horizontal de las aguas subterráneas, ya que estas se van moviendo a través de las escorias (de techo o de base) o fisuras de los *diques* siguiendo el camino que le obliga la gravedad o diferentes estructuras impermeables. Otro elemento fundamental en la hidrogeología de los acuíferos insulares son los paleosuelos o *almagres*, son unas capas de color rojizo que se forman cuando al finalizar una erupción transcurre tiempo suficiente para que se forme un suelo, con contenido en arcilla, al ocurrir una erupción, la colada para por encima de este suelo “cociéndolo” y haciéndolo impermeable. Estos paleosuelos a veces se pueden asociar a manantiales, en función de la posición del mismo y del movimiento del agua en el macizo.

Otro elemento geológico fundamental para las aguas subterráneas son los diques geológicos. Los diques son formaciones ígneas intrusivas forman las discontinuidades verticales o inclinadas más importantes y frecuentes, se forman por conductos por donde fluye el magma ascendente, el cual se enfría rápidamente, su espesor es variable de 1 a 6 metros como norma general, si son horizontales se denominan *sills*. Generalmente se concentran en la zonas de las dorsales de las islas, ahí, también se concentran las áreas donde más llueve. La característica fundamental que aportan los diques a los acuíferos insulares es que sobreelevan el acuífero, esto supone una ventaja en el aprovechamiento de las aguas subterráneas, ya que se pueden drenar mediante minas en cotas elevadas y por gravedad abastecer a los núcleos de población (en cotas más bajas y de costa) y cultivos colindantes.

Los deslizamientos también influyen en los acuíferos insulares, estos grandes movimientos de terreno pueden ocurrir por inestabilidades en los edificios insulares formados y por otros condicionantes ambientales, el caso es que cuando ocurren, crean una línea de deslizamiento formada por conglomerados de arcilla, piedras, de una manera caótica, las consecuencias para el acuífero son inmediatas, se forma una capa impermeable denominada por algunos autores como el *fanglomerado*, en el argot minero insular se denomina *mortalón*, al parecer por su similitud con la forma de una mortadela (matriz de arcilla más piedras) Ejemplos en Canarias

son conocidos entre otros, el del Valle de La Orotava, Güimar (Tenerife) , El Golfo (Hiero). A nivel de aprovechamiento hídrico, las minas de agua al llegar a la zona de fanglomerado, se hace prácticamente imposible el avance, a no ser que se utilicen entibaciones u otros métodos para garantizar la seguridad de la explotación, en otras ocasiones se percibe en algunas minas la reducción de sección debido a los movimientos de este material.



**Figura 2;** Un dique geológico atravesando el terreno, nótese la regularidad de la roca y la compacidad de la misma, salvo que presente un estado de fisuración importante, se puede considerar como una estructura impermeable.

La *hidroquímica* de aguas en Canarias también, está muy influenciada por la formación geológica que la contiene, en este caso se puede hacer una analogía con las características geotécnicas, las cuales podían variar de una zona a otra cercana, debido a la anisotropía y heterogeneidad del macizo, en el caso del agua ocurre prácticamente lo mismo, el agua captada de una galería con respecto a la más cercana puede variar notablemente en cantidad y calidad, incluso puede haber una zona de la captación, que se vea afectada por contaminación volcánica debido a grietas, actividad volcánicas residuales o la presencia de gases endógenos profundos (en general de degasificación de magmas en profundidad), principalmente el  $\text{CO}_2$ , el cual acelera mucho la alteración de las rocas volcánicas.

**Tabla 1;** material volcánico y permeabilidad.(Proyecto SPA15)

Unidad	Coefficiente de almacenamiento %	Permeabilidad m/d	Transmisividad m <sup>2</sup> /d
Basaltos alcalinos o antiguos	0,5 a 1	0,05 a 0,5	5-20
Traquitas	0,01-0,5	0,1 a 0,5	5-10
Traquitas-fonolitas	0,01-0,5	0,1 a 0,5	5-10
Materiales sedimentarios (formación detrítica)	3-5	1,5 a 8	50-200
Piroclastos basálticos	1-2	0,2-1	10-200



**Figura 3 ;** fisura con aporte de agua dentro de una mina de agua en la isla de La Gomera , se observa que la longitud a la que nos encontramos dentro de la explotación es 1.785 metros, es necesario perforar con mucha precaución y con un sondeo horizontal de al menos 50 metros para detectar bolsas de agua tras los diques.

### 3. OBRAS HIDRÁULICAS SUBTERRÁNEAS

En general en las islas existía un desconocimiento del acuífero insular, simplemente por observación, se notaba que existían unos manantiales en las vertientes, por donde brotaba el agua, con unos caudales que para aquélla época eran insuficientes, por lo que la iniciativa privada emprendió la tarea de excavar esos manantiales con la esperanza de alcanzar caudales mayores, con esta acción comenzaron las galerías de agua, que supusieron un avance económico sin igual en las islas eso si en manos privadas, lo que a la par ha supuesto la situación actual en la planificación hidrológica insular y los mercados del agua. La primera galería o mina de agua conocida en Canarias data del año 1897 (Brito W, 1995) fue la conocida como Roque Negro y Los Catalanes en el macizo de Anaga, en el Norte de Tenerife. En otras partes del mundo las galerías de agua reciben otros nombres como por ejemplo *dike tunnel* (Hawaii, USA) o *collection tunnel* en (Jeju island, Korea del Sur).

Un concepto fundamental para entender el aprovechamiento del acuífero por galerías a unas cotas tan elevadas sobre el nivel del mar es que el acuífero de las vertientes está sobreelevado debido a los diques basálticos que forman verdaderos enjambres y celdas donde el agua se almacena, estos diques basálticos, se forman a raíz de vías preferentes que ha seguido el magma para posteriormente enfriarse y formar paredes basálticas prácticamente impermeables, esto va a crear un escalonamiento del acuífero con gradientes hidráulicos que hace que sea dinámico. La mayor concentración de diques se establecen en las dorsales de las islas esto unido a que en general, estas dorsales son las zonas de mayor pluviometría de las islas, tanto lluvia vertical como horizontal, están son las zonas donde más elevado está el acuífero, aunque actualmente y por la sobreexplotación está en descenso continuo en algunos casos cuatro metros por año, lo que hace que muchas galerías se tengan que reperfilar o bien abandonar la explotación.

Las minas o galerías de agua son perforaciones o túneles con una sola boca, denominada como bocamina y una sección media de 1,5 x 2 m o incluso menor, aunque las realizadas por la Administración son de dimensiones sensiblemente mayores, solo en las islas Canarias hay 2.000 perforadas. Los trabajos de perforación se realizaban con ayuda de explosivos- Mediante una perforación ligeramente inclinada, por lo que no hace falta bombear el agua para su aprovechamiento; la galería tiene como finalidad alcanzar el acuífero y extraer el líquido. Normalmente, cuando se llega al objetivo se produce un alumbramiento abundante, las denominadas aguas de reserva (más cargadas de sales), pero luego los caudales tienden a estabilizarse mediante las aguas renovables o de recarga (más jóvenes); las longitudes que se alcanzan van desde los 1,5 Km a los 7 Km, el coste por metro lineal supera los 2.000 € por metro perforado. La producción de las galerías oscila entre unos pocos litros por segundo y los dos centenares, por ejemplo el pozo galería de Los Padrones en la isla de El Hierro obtiene un caudal de aproximadamente 80 L/s, con lo que casi podría abastecer la mayor parte de las demandas de la isla. La disminución de los caudales y el retraimiento del nivel del acuífero no afectan por igual a las diferentes zonas, aunque tiende a generalizarse. También se ha confirmado una progresiva pérdida de calidad en las aguas de las galerías, lo que se denomina una minería del agua fósil. La extracción a gran profundidad, en zonas volcánicas activas trae consigo un importante incremento en sales disueltas incluyendo también valores

elevados de flúor que en algunas explotaciones han llegado a alcanzar los 10 mg/L, siendo el máximo permitido por ley 1,5 mg/L.



**Figura 4** ; bocamina de una galería de agua y tren de transporte de operarios y material, a la derecha almacén de material e instalaciones auxiliares, también se puede observar los sistemas de ventilación. En algunas ocasiones los trabajos comienzan de madrugada , para evitar la mayoría de los gases que se forman en los frentes de mina , otro problema en la perforación de esta tipología de minas son las altas temperaturas de trabajo, en algunas ocasiones cercanas a 50°.



**Figura 5** ; sección de una galería en el Sur de la isla de Tenerife, se puede observar la falta de elementos para sostenimiento de la sección, habitual en perforaciones en terrenos volcánicos , salvo que nos encontremos en zonas de *fanglomerado* (superficie de un gran deslizamiento), materiales más fluidos como las pumitas, caída de prismas basálticos, coladas de piroclastos , etc....

Otra modalidad de mina, es aquella que aprovecha antiguos nacientes en la ladera, por este motivo tienen poca longitud, en comparación de las otras comentadas, de 10 a 100 metros, la idea es aumentar los caudales de los nacientes, muchas de estas minas de nacientes han acabado siendo minas o galería de agua en algunos casos con más de 6 kilómetros de longitud. Ejemplos de las minas de nacientes se pueden encontrar en el monte de Las Mercedes en Tenerife, con muchas de estas minas se abastece en parte a la ciudad de la Laguna de 150.000 habitantes. Otros tipos de minas son; los pozos-galería, se conforman de un pozo que cuando alcanza el nivel freático se construye una galería hacia la dorsal; otro tipo son las galerías en trancada, denominadas *inclined shaft* en Hawái, se trata de una mina que parte de la costa, con una inclinación hasta que alcanza el nivel freático, una vez allí se ejecutan varios ramales para aprovechar la mayor cantidad de recurso hídrico procedente de la descarga del acuífero.

Se puede considerar también como obras de aprovechamiento subterráneo a los pozos, sondeos y pozos canarios, unos 6.000 en todo el archipiélago; estos últimos tienen como característica disponer de un gran diámetro que puede llegar a los 3 metros, su profundidad también tiene unas dimensiones nada usuales, que en algunos casos pueden llegar a 700 metros de profundidad, esto implica; unos sistemas de bombeo en serie importantes, con un gran consumo energético; problemas con los gases volcánicos.

#### **4. HIDROLOGÍA SUPERFICIAL Y RÉGIMEN DE LLUVIAS**

La naturaleza geológica y climática de las islas volcánicas, con escasa pluviometría y elevada presión sobre los recursos hídricos por la población y la agricultura, no favorece la existencia de aguas superficiales permanentes en forma de ríos o lagos continentales; en otros sistemas insulares, con unas pluviometrías más elevadas y con la posibilidad de terrenos más impermeables, pueden dar lugar a lagos como en el caso del archipiélago de Azores (Terceira, San Miguel...) o incluso tener ríos o arroyos continuos durante todo el año, en Canarias aunque existieron hace del orden de 100 años, actualmente no existen lagos ni lagunas – a excepción de los formados en Gran Canaria por las presas-, y el único cauce con cierta continuidad es el del barranco de Las Angustias en la Palma.

En general los barrancos volcánicos, se pueden asemejar a las cuencas hidrográficas continentales, como vías de drenaje rápido de las lluvias acontecidas en las islas, si bien en el caso insular, debido a las pendientes –que son mayores que en los casos continentales–, los barrancos transportan mayor cantidad de sólidos y a una mayor velocidad (pueden alcanzar del orden de 10 m/s), lo que supone un problema de suma importancia para la conservación de las infraestructuras y obras superficiales, aguas abajo. Hay una mayor presencia de acarreo que, en los tramos finales, pueden llegar a ser potencias de más de 100 m, lo que supone un problema técnico para la concepción de la presa en el sentido de la ejecución de la cimentación o la estabilidad de los pozos, para la captación de los flujos subálveos.

Otro problema en relación a la hidrología superficial es que, en general, las islas volcánicas están en progresivo desmantelamiento mediante procesos erosivos, provocados principal-

mente por la erosión hídrica y en menor medida por la acción del viento (islas orientales), este proceso se ve dinamizado por las altas pendientes y la ausencia de cubierta vegetal en algunas zonas de las islas. Los procesos de alteración y erosión de los materiales volcánicos son relativamente rápidos, esto implica que la modelación erosiva y la generación de sedimentos con estos materiales, es muy rápida cuando se dan las condiciones climáticas adecuadas.

El agua que cae en las islas lo hace en distintas formas: lluvia, nieve, rocío, precipitación de niebla (*lluvia horizontal*, cotas 1.000-1.500 msnm). Aunque en ocasiones, las cumbres de las islas de mayor relieve pueden cubrirse de nieve, la mayor precipitación se manifiesta en forma de lluvia, la precipitación de niebla, fundamental en las islas occidentales, según autores pueden aportar al suelo del orden de 1,5 a 3 veces la precipitación regular de lluvia.

Otro aspecto a tener en cuenta en la gestión superficial de los recursos hídricos, es la enorme irregularidad climatológica de las propias islas (microclimas y pisos de vegetación o catenas), también entre archipiélagos de la Macaronesia general, por ejemplo entre las propias Islas Canarias o entre Cabo Verde y Azores etc.... también la gran pendiente de sus cauces los cuales determinan, que los proyectos de aprovechamiento de escorrentía superficial, exijan el complemento de obras auxiliares a las infraestructura de almacenamiento, balsas o embalses impermeabilizados artificialmente, tales como desarenadores, canales de derivación e hidro-ecías u obras de corrección de cauces, transversales o longitudinales.



**Figura 6;** manantiales y cascadas se suelen producir cuando ha habido un gran periodo de lluvias, raramente duran más de un par de meses, salvo el cauce del barranco de Las Angustias en la isla de La Palma, donde hay un pequeño cauce más regular aprovechado por un tomadero de barranco.

Por otro lado también es importante tener en cuenta; las fuertes precipitaciones que caracterizan un régimen torrencial característico de las islas, por ello es necesario conocer las posibles avenidas y caudales punta en los barrancos, la frecuencia de los mismos (cálculo para tiempos de retorno fiables) y volumen de aguas totales, también para su uso en la planificación territorial y la previsión de sus efectos en la población y en el territorio.

Las avenidas son los riesgos más importantes que se pueden presentar en los barrancos de las islas volcánicas, debido al régimen torrencial de lluvias ( concentraciones elevadas de precipitación en corto espacio de tiempo) y a la ocupación de los barrancos por edificaciones o infraestructuras, incluso basuras, reduciendo las secciones de evacuación, principalmente en las zonas más cercanas a la costa.



**Figura 7;** hidrotecnia o elemento de corrección de cauce en un barranco volcánico, esta tipología de obras en el ámbito de la ingeniería forestal, se hace muy necesaria en las islas volcánicas debido al régimen torrencial de sus precipitaciones y el elevado caudal de sólidos que pueden llegar a transportar, afectando a infraestructuras o poblaciones aguas abajo.

Desde el punto de vista del profesional de la ingeniería hidrológica, es necesario manejar los siguientes problemas técnicos que pueden aparecer en el diseño de obras hidráulicas en islas volcánicas.

- Diseño de tomaderos de barranco u obras de toma.
- Diseño de presas, (vertederos, muro, aliviaderos, capacidad...).

- Diseño de hidrotecnias, (pendientes de compensación, muros, diques, fajinas, diseño y materiales, resaltos hidráulicos...).
- Estimación de las pérdidas de suelo.
- Estimación de la tormenta de diseño y su conversión a una avenida generada en la cuenca volcánica.
- Estabilidad de encauzamientos (aguas abajo), terraplenes y laderas.
- Control de avenidas.
- Diseño de infraestructuras transversales al barranco, tales como puentes, pasos de caminos agroforestales, conducciones, obras de paso...

## 5. OBRAS HIDRÁULICAS SUPERFICIALES

Las aguas superficiales hasta los años 30 en Canarias suponían del orden de 100 hm<sup>3</sup> de agua (año 1900) que podía ser aprovechada desde los barrancos con medios técnicos muy primitivos, caso aparte era la isla de El Hierro, sin esa posibilidad, al no tener barrancos con flujo regular de agua, la isla de Fuerteventura con un elevado contenido salino de sus aguas superficiales de hasta 9 g de sal y Lanzarote sin apenas manantiales. Las aguas superficiales son sumamente importantes en un entorno insular debido a que; están muy poco cargadas de sales y por otro lado si no se aprovechan se pierden en el mar. La limitación de su uso, por lo tanto, es el volumen de aportación que pueden dar los barrancos.

**Tabla 2;** datos hidrológicos de escorrentía del archipiélago Canario. PHI de los diferentes Cabildos. (Datos en hm<sup>3</sup>).

Isla	Escorrentía (hm <sup>3</sup> )
Lanzarote	1,30
Fuerteventura	4,90
Gran Canaria	75,00
Tenerife	20,00
La Palma	15,00
La Gomera	8,00
El Hierro	0,30
Totales	124,50

Las principales obras para el aprovechamiento de las aguas superficiales son las presas, balsas y como obra accesoria los tomaderos de barranco. Como se ha comentado , una de las características hidrológicas del terreno volcánico es la gran permeabilidad en origen que lo caracteriza, este hecho condiciona notablemente la selección técnica y óptima del aprovechamiento hidráulico en una isla volcánica. En el caso de las Islas Canarias , como norma general se ha recurrido al agua subterránea ( en islas occidentales principalmente) para el abastecimiento de las islas, pero existen dos casos notables donde la apuesta para ese suministro, principalmente para la agricultura, fueron los embalses de agua , son los casos de Gran Canaria y La Gomera , debido a que estas islas disponían terrenos con cierta impermeabilidad. Para poder hacer viable la construcción de presas y embalses, existen inicialmente importantes problemas técnicos, sobre todo los relativos a la permeabilidad del suelo y a la viabilidad económica de la obra, ya que son las obras que más hay que invertir en su construcción y la que comparativamente aportan menos recursos hídricos, si bien su ventaja radica en el bajo coste de mantenimiento y que no necesitan aportes energéticos.

Para el aprovechamiento de las aguas que corren por los barrancos se puede optar por dos estrategias, una es la construcción de una presa, lo cual supone un esfuerzo económico, ambiental y técnico importante, también requiere de unos estudios previos de permeabilidad, fundamentales y costosos de realizar para el éxito de la infraestructura, como ya se ha comentado.



**Figura 8;** vista del embalse de Soria en la isla de Gran Canaria , su construcción duró 10 años , tiene una altura de 120 metros y una capacidad de 32 hm<sup>3</sup> , aunque nunca ha sobrepasado los 15 hm<sup>3</sup> , el muro de presa es de los más altos de España.

El otro sistema es la construcción mediante un tomadero que consiste en una derivación en el propio barranco; la derivación se puede realizar mediante un azud o pequeña presa, o bien un sistema de acumulación de aguas por rejillas, en definitiva, un tomadero es un aprovechamiento de aguas superficiales que se realiza a partir de toma directa de los barrancos, estos sólo están operativos cuando hay lluvias por lo que funcionan temporalmente y el agua recolectada se almacena en depósitos, balsas, incluso embalses cercanos. Es necesario un mantenimiento constante, debido a que cuando corren los barrancos se pueden ver afectados por los acarreo.

En las Islas Canarias se llegaron a construir más de 100 grandes presas de embalse entre 1900 y 1980. De todas ellas hay que destacar la presa bóveda de Soria (Gran Canaria), que con sus 132 metros de altura ocupa en España el puesto número doce en la relación de las de mayor altura. En el caso de Canarias se puede hablar de tres etapas de construcción de presas:

- Las presas antiguas de mampostería con mortero de cal.
- Las presas con mortero mixto de cal y cemento.
- Las presas modernas.

Las primeras presas construidas eran como pequeños muros o azudes de derivación para las *gavias* o *maretas*. Los materiales utilizados eran mampostería, construidas con materiales locales y morteros de cemento-arena. Las presas más modernas son realizadas mediante hormigón.

Aunque en general, ya se ha comentado que los terrenos volcánicos son permeables en general salvo cuando afloran los complejos basales o materiales impermeables, para poder construir estos embalses era necesario disponer de terrenos impermeables, debido a la necesidad de embalsar esa agua que corría por los barrancos con motivo de las lluvias, en algunas ocasiones se recurrió a impermeabilizar el vaso del embalse, en terrenos con baja permeabilidad mediante morteros de cal y cemento, el coste de esta actuación muchas veces no era justificable para el rendimiento obtenido, no obstante en aquella época no existía la posibilidad de la desalación de agua de mar, que existe actualmente por lo que en muchas ocasiones no quedaba más remedio que recurrir a estas actuaciones tan antieconómicas.

Otra cuestión importante es la calidad del agua embalsada, el material geológico del que están compuestos los barrancos, así como el de las cuencas aportadoras, condicionan de sobremañera la calidad de las aguas que transportan, así serán más salinas cuanto más nos acerquemos a las islas orientales como es el caso de la isla de Fuerteventura. Esto habrá que tenerlo en cuenta a la hora de planificar un embalse, por el uso que se vaya a dar al agua embalsada. Este uso nunca va a ser abastecimiento urbano quedando limitado en las islas Canarias a usos agrícolas principalmente. Otro aspecto es la eutrofización del agua almacenada, este hecho se evidencia por el extenso tiempo de residencia del agua en esta tipología de embalses y por carecer de una caudal constante aguas arriba.

En general los grandes embalses de cientos de hectómetros cúbicos que se ven en un terreno continental, no tienen cabida en terrenos insulares volcánicos, actualmente para la construcción de embalses, no hay localizaciones viables económicamente ni competentes, geológicamente hablando; en el archipiélago, para ejecutar este tipo de obras, incluso varios autores, apuntan que en este tipo de terrenos volcánicos, la viabilidad y funcionalidad de las mismas está muy discutida, básicamente por la falta de terrenos adecuados y el poco rendimiento de las mismas ya que, a igualdad de material constructivo, con una presa en terreno continental se obtiene mayores volúmenes de agua, cuando en el territorio volcánico se habla de casi uno o dos hectómetros como mucho, además las presas en terrenos volcánicos no tienen un río o un flujo continuo de agua que vaya regenerando los caudales.

Las presas en Canarias tienen una relativa vida útil reducida, debido a un régimen torrencial de lluvias que transportan un caudal de sólidos importante, sobre todo cuando esos caudales, que proceden de barrancos que no están recubiertos de una masa forestal; por lo tanto, existe una compatibilidad de la ejecución de las hidrotécnicas superficiales de retención de sedimentos, con las grandes obras hidráulicas debido a la capacidad de aquellas de disminuir el efecto de la erosión y el transporte de materiales, incrementando así la vida útil de las presas, esta técnica ha sido profusamente utilizada en Gran Canaria.

Un aspecto positivo y una gran apuesta de futuro son la obtención de energía mediante centrales hidráulicas reversibles utilizando dos embalses a diferente cota, como es el caso de la futura central reversible entre los embalses de Chira y Soria con una diferencia de cota de unos 400 m en la isla de Gran Canaria, que se espera produzca el 25% del consumo energético de la isla. Este proyecto sigue la tendencia general del archipiélago de apostar por la energía hidráulica con otros proyectos realizados como el de la isla de El Hierro y futuras actuaciones en la isla de Tenerife y la Palma, si bien en estos casos los embalses son de balsas impermeabilizadas artificialmente.

La otra obra magna, en relación a los recursos superficiales son las balsas (si no hay terrenos impermeables se impermeabilizan mediante lámina plástica). En un terreno insular las balsas tienen como función, la regulación de los recursos hídricos disponibles para adecuarlos a las demandas, especialmente en el riego agrícola. Esta regulación se hace almacenando aguas superficiales captadas por barrancos cuando estos, por las lluvias, disponen de la misma, o bien aguas excedentes de las galerías.

Las balsas se diferencian de las presas en Canarias fundamentalmente por que están impermeabilizadas artificialmente además, las balsas no interceptan normalmente un curso de agua, con lo que no existe cuenca aportante, careciendo por tanto de avenidas. Es decir son elemento de almacenamiento y regulación, no de captación, aunque en algunos casos están conectadas a barrancos próximos mediante conducciones para aprovechar el agua que interceptan los tomaderos. La evaporación del agua almacenada en las balsas se ha estimado en función de la vertiente de la isla estudiada (barlovento-sotavento), resultando una evaporación de 5 mm al día en la cara Norte y de 7 mm en la cara Sur.

## 6. DISTRIBUCIÓN DE AGUAS

Después de comentar las singularidades la captación , tanto superficial como subterráneo del agua en la islas volcánicas hay que revisar la cuestión del transporte del recurso mediante las conducciones. Con respecto a la distribución de aguas el problema fundamental es que las zonas de aprovechamiento de aguas , raramente coinciden con las zonas de consumo.

El agua en las Islas Canarias se transporta mediante acequias, *tageas*, canales y tuberías. Pero las conducciones actuales del agua en cantidades significativas se hacen a través de canales, que son vías artificiales, en las que el agua circula sin presión, es decir en contacto continuo con la atmósfera. Inicialmente los canales se construyeron, entre finales del siglo XIX y principios del XX para el transporte del agua desde los nacientes a los centros de consumo. En ellos, el agua se desplaza por gravedad sin consumo energético esto implica que el diseño de las pendientes debe ser lo más eficiente posible. Y con la particularidad de que los más kilométricos son de trasvase de las zonas húmedas de barlovento hacia el árido sotavento donde primero cultivos de exportación, sobre todo de tomates, y luego los polos de desarrollo turístico demandaron mucho caudal. Sólo en la isla de Tenerife existen más de 4.000 Km construidos de conducciones.



**Figura 9** ; canal excavado en roca en la isla de Tenerife ( Los Gigantes-Masca) , nótese la dificultad de la ejecución de la obra de transporte , sobre todo a la hora de mantener una pendiente constante.



**Figura 10** ; en algunas zonas de las islas la multiplicidad de líneas de transporte de gestión hace muy difícil la gestión hidráulica , sólo en la isla de Tenerife existen 4000 kilómetros de conducciones.

## **7. ALGUNAS OBRAS HIDRÁULICAS TRADICIONALES EN EL ARCHIPIÉLAGO CANARIO**

Para describir las obras hidráulicas estudiadas en las islas volcánicas sería necesario un libro completo, con el ánimo de completar el presente artículo se resumen las principales -aún en activo y trabajando eficientemente- que se pueden encontrar a lo largo de la geografía insular y en otras partes del mundo, como por ejemplo; Israel , Argelia o Túnez.

**Gavias:** Con mayor presencia en las islas orientales, es un muro de materiales sueltos, transversales al cauce del barranco, que actúa como canal de alivio cuando hay demasiada precipitación y caudales. La *gavia* intercepta la escorrentía cuando llueve. Aumenta la infiltración y potencia la precipitación en aproximadamente unos 200 mm más de la lluvia convencional en el territorio donde se ubica. Esto hace que favorezca todos los cultivos de secano que se puedan dar en esa zona. También favorece que se conserve el suelo y que dicho suelo se quede establecido en esa zona y favorezca todos los procesos agrícolas. Otra de sus características es que todos los fertilizantes y nutrientes de las zonas altas de las islas, son retenidos en estos terrenos y por ello también aprovechados por las plantas. Hay que destacar que se concentran en zonas más o menos llanas, de grandes dimensiones y cercanas a las costas.

**Nateros:** Se localizan en islas occidentales principalmente. De menores dimensiones que las gavias, viene a ser un muro de piedra de unos metros aproximadamente. Transversal al barranco, pero en zonas altas de la isla y que nos pueden dar una extensión de terreno como para una especie arbórea o un cultivo de secano. Otra de sus funciones es la de dique de retención de sedimentos que evitan que este material acabe en el mar o como acarreo de barranco, que también es una función de conservación de suelo.



**Figura 11 ;** en la ladera a la izquierda se pueden observar las gavias, en este caso con cierto abanqueamiento, a la derecha las cadenas o muros, que funcionan como elementos de conservación de suelo y escorrentía en las laderas, entre ambos elementos hidráulicos se encuentra el barranco encauzado, esta foto corresponde a la isla Fuerteventura.

**Las maretas:** Se pueden encontrar en las islas orientales. Y las podremos clasificar en dos tipos: Maretas de derivación con desarenador y Maretas de concentración. La diferencia entre ambas está en que la de concentración, tiene una superficie de recogida de agua, la alcogida, con material impermeable para concentrar el agua de la lluvia en el depósito. La maretta de derivación, se encarga de que cuando el barranco lleva agua, se construye un pequeño canal que llega hasta la obra hidráulica, y previamente antes de llegar al depósito, pasa por un desarenador donde queda retenido cualquier material suelto que lleve ese agua.

**Aljibes:** Depósitos, utilizados especialmente en las islas orientales, para recoger y almacenar el agua de la lluvia. Muchos pueblos destacan en su paisaje, por casas con tejados de gran pronunciación, los cuales tienen la función de recoger el agua de la lluvia para ser reconducida

hacia el aljibe que suele situarse bajo los patios de las viviendas. En los años 70 en la isla de Lanzarote más del 90% de las casas disponían de aljibe.

**Bancales:** Recuperan terreno en la ladera, para el uso agrícola, además se conservan los suelos, evita la erosión por lo tanto. El agua que fluye por la ladera, queda retenida por es muro, la intercepta, y favorece que haya mayor disponibilidad de agua y por tanto, mayor facilidad de hacer cualquier tipo de cultivo. Además crean también un paisaje singular.

**Enarenados:** Se utiliza sobre todo en Lanzarote. Se cubre un pequeño terreno con picón negro (lapilli volcánico) que absorbe intensamente la radiación solar, enfriándose por la noche rápidamente por su baja conductividad térmica, lo que produce la condensación del vapor del agua de la atmósfera. Con esto favorece el cultivo agrícola (generalmente de viñas). Se acompaña de unas especies de hondonadas para evitar el efecto del viento en la plantación. Esta técnica es de origen canario (200 años), se utiliza también en Almería.

#### REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- Brito, W. (1995); *El Agua en Canarias y el siglo XXI*. Ed. Cabildo Insular de Gran Canaria. 129 p.
- Custodio, E. (1978); *Geohidrología de terrenos e islas volcánicas*. Centro de estudios Hidrográficos. Madrid.
- Custodio, E. Y Llamas, M.R. (1976); *Hidrología subterránea*. 2 Vols. Ed. Omega, Barcelona, (reedición 1983).
- M.O.P DIRECCIÓN GENERAL DE OBRAS HIDRÁULICAS. *Estudio científico de los recursos del agua en las islas Canarias (SPA/69/515)*. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. UNESCO. Madrid. España. 1975
- M.O.P DIRECCIÓN GENERAL DE OBRAS HIDRÁULICAS. *Estudio científico de los recursos del agua en las islas Canarias (Informe General 2)*, Fondo Especial de Naciones Unidas, UNESCO, Madrid. 1972
- PLANES HIDROLÓGICOS INSULARES DE LAS ISLAS CANARIAS.
- Santamarta Cerezal, J.C.; Hernández Gutiérrez LE. (2012); *Minería del agua y recursos hídricos en islas y terrenos volcánicos*. Documental audiovisual. Universidad de La laguna.
- Santamarta Cerezal, J.C. Et al.(2012); *Hidrología y recursos hídricos en islas y terrenos volcánicos*. Colegio de Ingenieros de Montes en Canarias. Inédito. Tenerife.
- Santamarta cerezal, J.C; García Rodríguez, M (2012); *Gestión Histórica de los recursos forestales e hídricos en los Montes Canarios*. SECF, reunión de historia Forestal, Vitoria.
- Santamarta Cerezal, J.C. (2011); *El agua en Canarias. Historia, ciencia y tecnología*. Boletín de la Real Sociedad Económica de Amigos del País de Tenerife, nº 9, 4ª Época.
- Santamarta Cerezal, J.C. Et al.(2012); *Forest Hydrology, soil conservation and Green Barriers in Canary Islands*. Notulae Botanicae Journal. nº 40 (2). Rumanía.
- Santamarta Cerezal, J.C. ; González González, J. (2012); *Singularidades y evolución técnica de la ingeniería de presas en las Islas Canarias*. Revista de Obras Públicas número 3530. Madrid.
- Santamarta Cerezal, J.C.; Seijas, J. (2009); *Fundamentos y tecnologías para la captación y uso del agua procedente de la lluvia horizontal en los Montes Canarios*. Revista Montes, Marzo. Madrid.

- Santamarta Cerezal, J.C. (2009). *Singularidades sobre la construcción, planificación y gestión de las obras y recursos hídricos subterráneos en medios volcánicos. Estudio del caso en las Islas Canarias occidentales*. Tesis (Doctoral), E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM). Universidad Politécnica de Madrid.
- Santamarta Cerezal, J.C. Rodríguez Martín, J. (2011). *Sistemas de avance y perforación en la minería de agua dulce en terrenos volcánicos*. Revista Ingeopress nº 206. Agosto. Monográfico Perforación y voladuras.
- Santamarta Cerezal J.C. (2009); La minería del agua en el archipiélago canario. De Re Metallica. Sociedad Española para la Defensa del Patrimonio Geológico y Minero. De Re Metallica nº 12 pág. 1-8
- Suarez Moreno, F. (2009); El agua en canarias, Historia Estrategias y procedimientos didácticos. Tenerife.

## PLAN DE REGADÍOS DE CANARIAS

Rosa Vilar, Bernardo de la, Ing. Agrónomo. Jefe del Servicio de Planificación de Obras y Ordenación Rural de la Dirección General de Agricultura y Desarrollo Rural. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Aguas. Gobierno de Canarias.

*brosvil@gobiernodecanarias.org*

Hernández Abreu, José Manuel, Ing. Agrónomo. Consultor en riegos.

*jmanuelhabreu@hotmail.com*

Rodrigo López, Jesús Dr. Ing. Agrónomo. Catedrático de Universidad jubilado. Consultor en riegos.

*jrodrigo@ull.es*

González Hernández, José Francisco, Ing. Agrónomo. Consultor en riegos.

*paco@agrimac.es*

Pérez Carballo, Antonio Ing. Agrónomo. Consultor en riegos.

*antonio@agrimac.es*

**RESUMEN:** Se presentan los criterios con los que se está elaborando el Plan de Regadíos de Canarias, siguiendo las directrices establecidas en el nuevo Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural para el período 2014-2020, describiendo la metodología, las líneas de actuación que se contemplan y su priorización. Con este Plan se pretende continuar con los trabajos de modernización del regadío en Canarias iniciados por el Ministerio de Agricultura desde la década de los setenta del pasado siglo e intensificados a partir de los años noventa, que tan buenos resultados han conseguido en la mejora de la eficiencia de riego, adaptándolos a las necesidades actuales del sector agrario y propiciando la introducción de las nuevas tecnologías.

### 1. INTRODUCCIÓN

La Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Aguas del Gobierno de Canarias a través de su Dirección General de Agricultura y Desarrollo Rural está elaborando el Plan de Regadíos de Canarias, con el fin de disponer de un documento de planificación a medio plazo de sus actuaciones en materia de regadíos y para su financiación con cargo al próximo período del Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (FEADER) de la Unión Europea, Gobierno de España y Gobierno de Canarias que abarcará el septenio 2014-2020, cuya normativa habrá de cumplir si se quiere acceder a los recursos financieros establecidos por dicho Fondo. Aun está bajo discusión el Reglamento que establecerá estas disposiciones, pero ya se conocen borradores que permiten apreciar las tendencias al respecto. En el FEADER se pretenden cubrir una amplísima gama de objetivos relativos al desarrollo de los espacios rurales europeos, por lo que se recogen múltiples líneas de actuación. En lo que respecta al regadío, tratándose de un Reglamento de tan amplio alcance, se aborda con carácter general la problemática del regadío en la agricultura continental europea, con características estructurales muy diferentes a las de Canarias, por lo que se espera que se puedan introducir determinadas salvedades para

las Regiones Ultraperiféricas Europeas que posteriormente permitan modular y adaptar para las Islas algunas de las disposiciones reglamentarias.

Así pues, los objetivos del Plan de Regadíos, han de coincidir necesariamente con los objetivos del futuro FEADER. Así, entre otros, el FEADER establece dos enfoques complementarios a tener presente en el Plan:

- Promover la eficiencia de los recursos y alentar el paso a una economía hipocarbónica, capaz de adaptarse a los cambios en el sector agrícola y el de los alimentos, haciendo especial hincapié en:
  - a) lograr un uso más eficiente del agua en la agricultura;
  - b) lograr un uso más eficiente de la energía en la agricultura y en la transformación de alimentos;
  - c) acilitar el suministro y el uso de fuentes renovables de energía, subproductos, desechos, residuos y demás materia prima no alimentaria para impulsar el desarrollo de la bioeconomía;

Con ello se pretende:

- Apoyar la modernización de las explotaciones agrarias incrementando su productividad
- Mejorar la renta y la calidad de vida de los agricultores
- Crear y mantener empleos, manteniendo la población en las zonas rurales
- Ayudar a la consolidación del sistema agroalimentario
- Implementar las tecnologías de la información y la comunicación en el medio rural
- Racionalizar y optimizar el consumo de energía en el ciclo del agua
- Formar y capacitar a los agricultores
- Fomentar la agricultura de regadío respetuosa con el medio mediante la aplicación de buenas prácticas agrarias
- Pero también, desde un enfoque complementario, restaurar, preservar y mejorar los ecosistemas dependientes de la agricultura, haciendo especial hincapié en restaurar y preservar la biodiversidad incluida en los sistemas agrarios de gran valor natural y los paisajes europeos.

## **2. METODOLOGÍA**

El procedimiento de ejecución ha seguido dos fases. La primera se ha realizado a nivel insular y en base a los trabajos insulares, ya finalizados, se está abordando la elaboración del Plan Regional.

Los trabajos de carácter insular han consistido en:

- 1) Recopilación de las obras y actuaciones realizadas en materia de regadíos por las distintas Administraciones públicas en cada isla hasta el año 2011. Asimismo, se recopilaron y estudiaron los datos básicos agrarios, sirviendo de base los últimos mapas de cultivo disponibles.
- 2) Estudio del marco de la planificación hidrológica, contenida en el correspondiente Plan y/o Avance, como documento básico de coordinación de todas las actuaciones en materia hidráulica, con especial atención a las previsiones de los consumos agrarios.
- 3) Estudio de la zonificación a adoptar para dividir el territorio en áreas homogéneas en cuanto actuaciones en materia de regadíos, de acuerdo con las reseñadas en el marco de cada PHI, señalando para cada una de ellas las infraestructuras hidráulicas existentes, los recursos hídricos y los correspondientes balances hídricos.
- 4) Solicitud de propuestas concretas de actuaciones en materia de regadíos a las siguientes instituciones: Consejos Insulares de Aguas, Entidades relacionadas con el agua, Agencias de Extensión Agrarias por comarcas, Ayuntamientos y Cooperativas, en especial aquellas que se dediquen, además, a la distribución de aguas.
- 5) Con la información recibida, después de proceder a su análisis y su evaluación socioeconómica, se ha confeccionado un catálogo de las actuaciones que proceden, valoradas económicamente y priorizadas de acuerdo con los criterios establecidos para cada isla.

En base a los Planes Insulares se elaborará el Plan regional, homogeneizando criterios, sin perjuicio de atender a las necesidades derivadas de las especificidades de cada isla, recogiendo para cada una de ellas las actuaciones mejor valoradas, aplicando criterios de equilibrio territorial.

## **3. CARACTERIZACIÓN DE LOS ACTUALES REGADÍOS**

No es posible detallar en el ámbito de esta comunicación las características del regadío en Canarias y sus peculiaridades recogidas en los diversos documentos de alcance insular, pero sí conviene recordar algunas características esenciales.

El regadío en Canarias se ha caracterizado por el predominio de las aguas privadas sobre las públicas, así como la no adscripción del agua a la tierra. Como consecuencia de ello, la gestión del agua ha sido realizada fundamentalmente por los Heredamientos y Comunidades de Aguas amparadas en la Ley Especial para Canarias de 27 de diciembre de 1956, teniendo las Comunidades de Regantes, concesionarios de aguas públicas, una escasa representación muy localizadas en La Gomera, San Andrés y Sauces en La Palma y la Aldea de San Nicolás en Gran Canaria. Tanto las redes de transporte del agua en alta como las conducciones de distribución hasta los lugares o puntos de utilización también son mayoritariamente privadas.

Esto ha inducido a los agricultores canarios a ser muy eficientes, estimulados por el alto precio del agua en el mercado, si los comparamos con sus homólogos continentales para los que el agua suponía un concepto casi despreciable en su estructura de costes. Es decir, en el regadío de Canarias se vienen aplicando, desde siempre, las “políticas tarifarias” que como incentivo de la eficiencia se aplican recientemente en el resto de la Unión Europea, en especial desde la entrada en vigor de la Directiva Marco del Agua (Directiva 2000/60/CE).

Por otra parte, el proceso de desarrollo del sistema de captación y distribución del agua, que se inició a finales del siglo XIX, ha ido en paralelo al desarrollo agrícola y muy ligado a las actividades del cultivo del plátano y al tomate. Dicho proceso ha estado falto de una planificación integral, predominando la visión individualista por encima de la cooperativa, de manera tal que, por ejemplo, la capacidad de almacenamiento conseguida se ha llevado a cabo mediante la construcción de depósitos individuales, numerosos, pero muy pequeños. Con lo cual, poco o nada se han aprovechado las notables economías de escala características de este tipo de obras. El mismo diagnóstico cabe emitir con respecto a la red de canales. Aunque la iniciativa privada ha tendido centenares de kilómetros de canales y conducciones, fue incapaz de promover y hacerse cargo de los de carácter estratégico, es decir, de aquellos que perseguían la mejor utilización de los recursos hídricos a escala insular, que finalmente debieron ser realizados en la mayoría de los casos por la Administración Pública. El sistema de distribución dominante, con unos turnos de agua o “adulamientos” bastante rígidos cada 10, 12 ó 15 días, ha obligado a la construcción de numerosísimos estanques para independizar el riego del adulamiento y disponer de sistemas de riego a presión. En definitiva, se trata de una infraestructura primaria con mayor o menor grado de desarrollo y en variable estado de conservación de la que parten multitud de conducciones privadas para llevar el agua, que cada agricultor ha debido obtener individualmente, a cada finca. Así pues, la infraestructura del regadío tradicional era, y en algunas zonas continúa siendo, muy poco eficiente.

Por ello, cuando el desarrollo urbano y turístico fue demandando mayores cantidades de agua y se incrementó el precio del recurso, los agricultores, con el apoyo de la administración, han realizado un notable esfuerzo inversor en la modernización de los sistemas de riego, alcanzando un nivel tecnológico muy considerable y reconocido internacionalmente. Así lo ponen de manifiesto los dos estudios de evaluación del regadío realizados en Tenerife, el último del año 2005, que pone de manifiesto unas eficiencias de riego a nivel de finca muy altas, especialmente para los cultivos de costa que son los de necesidades hídricas más elevadas y por lo tanto los que más contribuyen al consumo agrario.

**Cuadro 1.** Evolución de las superficies de regadío y sus consumos hídricos en Tenerife

Cultivos	Isla de Tenerife					
	Superficie (ha)			Consumo (hm <sup>3</sup> )		
	1986	2005	Dif %	1986	2005	Dif %
Platanera	5.088,29	4.256,67	-16,34	76,010	51,291	-32,52
Frutales subtropicales	920,60	1.006,56	9,34	7,924	5,813	-26,64
Tomates	1.629,37	1.045,46	-35,84	13,307	5,597	-57,94
Hortalizas	1.687,25	1.848,76	9,57	6,480	10,648	64,32
Ornamentales	329,39	537,63	63,22	2,777	4,284	54,26
Papas	4.120,36	2.630,49	-36,16	14,811	10,630	-28,23
Viña	1.542,01	2.204,97	42,99	2,299	3,500	52,25
Total	15.317,27	13.530,54	-11,66	123,608	91,763	-25,76

En el Cuadro 1 se presenta la evolución de los consumos hídricos agrícolas y las superficies de regadío entre los años 1986 y 2005 en la isla de Tenerife. Así se ve que en el total de la isla la superficie de regadío ha disminuido en un 11,7 %, mientras que los consumos lo han hecho en un 25,8 %. La disminución porcentualmente mayor en el consumo que en la superficie (sin cambio apenas de cultivos en los de mayor demanda, platanera y hortalizas) significa que ha aumentado sustancialmente la eficiencia de riego, que los agricultores están utilizando hoy mejor el agua que en 1986. En términos de consumo agrario esta mejora de eficiencia, supone un ahorro en los regadíos de Tenerife de 17,4 hm<sup>3</sup>/año.

Mientras que ello ha sucedido en el sector agrícola, el consumo urbano no parece haber hecho el esfuerzo suficiente en la reducción de las pérdidas en las redes de abasto, ni en el control de los vertidos en las redes de alcantarillado para mejorar la calidad de las aguas depuradas y en consecuencia hacer menos costosos los tratamientos terciarios de las mismas.

#### 4. LÍNEAS DE ACTUACIÓN

Las que figuran en los catálogos de actuaciones elaborados para cada isla se han agrupado en 5 objetivos, que se mantendrán en el Plan de Regadíos de Canarias:

- A) Mejora de la eficiencia de los actuales regadíos
- B) Mejora de la calidad de los recursos disponibles
- C) Utilización de nuevos recursos para regadío
- D) Regadíos infradotados

## E) Nuevos regadíos

El orden en que se han enunciado, indica la prioridad general de los cinco tipos de actuaciones. Esta prioridad se ha establecido basándose en los criterios que seguidamente se exponen. Sin embargo, al estudiar las actuaciones concretas, pueden intervenir otros criterios que otorguen prioridad a actuaciones que pertenezcan a las líneas menos valoradas y viceversa.

Por otra parte hay actuaciones que podrían incluirse en más de uno de los apartados anteriores ya que con ellas se consiguen varios objetivos. Por ejemplo, si se trata de instalar una EDAM para desalar el agua de mar se debería incluir en el apartado C) pero también cabría en el B) ya que las aguas producidas de baja salinidad pueden mezclarse con aguas subterráneas de peor calidad para mejorarlas.

## A) La mejora de la eficiencia de los actuales regadíos

En una región como el Archipiélago Canario, donde los estudios hidrogeológicos apuntan que la extracción de los acuíferos supera en muchas islas la recarga de los mismos, el uso racional de los recursos disponibles es de la máxima prioridad. Por ello, el uso eficiente del agua en la agricultura, que supone un alto porcentaje de las demandas hídricas en las islas, es de gran importancia para la sostenibilidad de los sistemas hidráulicos. Pero también lo es, como se ha señalado anteriormente, para la productividad de las explotaciones, ya que el agua supone un coste relevante en la estructura de gastos de producción.

La eficiencia de riego en una determinada zona y durante un periodo de tiempo determinado es la relación entre el agua consumida en beneficio de la agricultura y el total del agua utilizada, menos el incremento del volumen de agua almacenada. Los únicos datos conocidos de esta eficiencia se han obtenido en la isla de Tenerife para el cultivo de platanera y el tomate de exportación, principales consumidores de agua. Estas eficiencias en finca varían desde un 50% en zonas donde todavía se practica el riego a manta hasta 95% en riego localizado de tomates con cultivo sin suelo.

Este balance entre el agua consumida respecto al agua efectivamente aprovechada puede aplicarse también parcialmente a las diversas operaciones de manejo del agua en el regadío.

Estas operaciones son:

- Captación y almacenamiento del agua
- Conducciones en alta o principales para uso general
- Almacenamiento general en la zona de riego
- Conducciones generales del regadío
- Almacenamiento en finca
- Aplicación en finca

El Plan de Regadíos de Canarias, con carácter general, y sin poner en duda su relevancia, no abordará las dos primeras fases que no son, en general, exclusivas del regadío, y por lo tanto deben ser abordadas en el marco de actuación de instancias competentes en infraestructura hidráulica general.

Por el contrario, incrementar la eficiencia del almacenamiento y del transporte en las conducciones generales en las zonas de riego se considera de la máxima prioridad en un programa de contenido agrario. En este apartado pueden tener cabida actuaciones de diversa naturaleza, desde la reposición de las conducciones en mal estado, especialmente los canales a cielo abierto, hasta la construcción de depósitos de cabecera o nuevas redes de distribución a presión que permitan un manejo más eficiente de los regadíos que actualmente no siempre puede alcanzarse por la compleja proliferación de conducciones y pequeños estanques construidos individualmente.

Este tipo de actuaciones ya se incluyeron en el *Programa de Actuaciones en materia de Regadíos en las islas Canarias hasta el año 2000* (PRECAN 2000) en el que se propuso que el sistema de reparto de agua para el regadío acabe funcionando como el urbano, en el que cada agricultor se conecte con su contador a una moderna red de distribución con la única limitación de los turnos de riego, pero en todo caso mucho más flexibles que los sistemas de “dulas”. Esta red debería estar gestionada por asociaciones de agricultores o por entidades públicas o privadas especializadas que, además, deberán conseguir el agua necesaria en cantidad y calidad o aportar las suyas, integrando las distintas fuentes de suministro de agua de cada zona.

Este sistema de reparto presenta numerosas ventajas como se ha demostrado en las actuaciones ya ejecutadas:

Ahorro global del agua, que supera el 40 % considerando el conjunto de la red más la instalación de equipos de riego a presión en finca.

Ahorro energético al entregar el agua con la suficiente presión.

Posibilidad de la implantación de métodos de riego a presión, aspersión o localizado, en fincas de reducido tamaño y/o que carecen de depósito de cabecera.

Mejora en la gestión de la red que se refleja en un mayor control del consumo de agua tanto por parte del agricultor como por la entidad que la gestiona.

Simplificación de la administración del recurso, que amplía las posibilidades de ahorro.

Las actuaciones para la mejora de la eficiencia de riego en las dos últimas fases contempladas (almacenamiento y aplicación en finca), son fundamentalmente de interés particular, por lo que deben ser abordadas a iniciativa de estos, mediante los adecuados programas de apoyo y fomento de las mismas.

Sin embargo, la eficiencia en las finca no sólo se mejora con instalaciones que permitan un manejo más eficiente del riego sino, sobre todo, con formación y capacitación de los regantes y poniendo a disposición de los mismos programas de asesoramiento y de transferencia tecnológica para que puedan poner en práctica un buen manejo del agua al nivel de parcela, evitando daños a las cosechas por exceso o defecto de riego y las pérdidas innecesarias por percolación. No es extraño que en una misma zona de riego, para un mismo cultivo, calidad de agua y sistema de riego, existan agricultores cuya dotación de riego duplica o es la mitad de la que usa la media.

Por ello, es presumible que una actuación decidida en este aspecto pueda mejorar en varios puntos la eficiencia global del regadío en las islas. Se trata de actuaciones que necesariamente requieren la participación del sector privado, pero que difícilmente pueden abordarse por éste sin una participación de la Administración, que hasta ahora ha sido notoriamente insuficiente en comparación con la magnitud del problema. Únicamente la isla de Tenerife cuenta con un Servicio de Asesoría en Riegos dependiente de su Cabildo Insular. La instalación de estaciones agrometeorológicas en las principales zonas agrícolas de las islas es una base fundamental para cualquier medida encaminada a la mejora del manejo del riego.

Por último, esta mayor eficiencia contribuiría también a la sostenibilidad del regadío evitando la contaminación del acuífero como consecuencia de la percolación profunda de aguas de riego contaminadas con fertilizantes y pesticidas. Esto puede ser importante en algunas zonas con determinadas configuraciones geomorfológicas, en cuya área de influencia hidráulica se efectúa una práctica intensiva del regadío. Así parecen confirmarlo algunos estudios realizados respecto a la presencia de concentraciones elevadas de nitratos.

## **B) La mejora de la calidad de los recursos disponibles**

A medida que la producción agraria de los países desarrollados, se torna menos competitiva que la de los países en vías de desarrollo en su función de pura suministradora de materias primas y alimentos, se introducen estrategias de diversificación y mejora de la calidad de las producciones agrarias como elementos para poder seguir compitiendo atendiendo a aquellos sectores de la demanda más selectivos y exigentes, pero dispuestos a pagar un sobreprecio por ello.

En este proceso, el agua no es sólo un factor limitante de la producción en términos cuantitativos, sino que pasa a jugar un papel preponderante en la calidad de los productos que se obtienen e incluso en la viabilidad de abordar la producción de nuevos productos. Esto es especialmente importante en Canarias, que depende fundamentalmente de recursos subterráneos afectados por la actividad volcánica del medio y/o la intrusión marina, que en la mayoría de los casos aportan un agua con una aptitud para el riego muy comprometida. En las últimas décadas se viene produciendo un empeoramiento notorio de la calidad del agua disponible para uso agrario, hasta el punto que podría decirse, habida cuenta de la necesidad y el costo de los tratamientos correctores, que la calidad del agua es una nueva desventaja estructural para la agricultura de las islas que se añade a la escasez, estando ambos íntimamente ligados.

Como consecuencia de lo anterior, si se comparan las prácticas de riego en la agricultura intensiva de hoy con las de hace veinte años, llama la atención el uso de toda una tecnología, más o menos sofisticada, de tratamiento de las aguas para mejorar su calidad, especialmente para la corrección de aguas bicarbonatadas, que supone un nuevo coste añadido al propio del agua y que incide de forma apreciable en los costes de cultivo.

En cuanto a la corrección de la salinidad, el sistema más económico y efectivo continúa siendo la mezcla de aguas, si se dispone de fuentes de agua de buena calidad. A este fin resulta muy apropiado el uso de agua de mar desalada. Otra actuación es la desalinización del agua subterránea mediante osmosis inversa (OI), electrodiálisis reversible (EDR) o cualquier otra tecnología adecuada a las características químicas de las aguas. Estos tratamientos, cuando son aplicados en cabecera de zona regable, permiten obtener economías de escala y tratamientos más completos efectuados con las debidas garantías técnicas y de seguridad. En este sentido ha sido muy importante el esfuerzo realizado tanto por la iniciativa privada como principalmente por la pública en la construcción de estaciones desalinizadoras de agua subterránea (EDAS). No obstante, el resultado obtenido y los costes resultantes arrojan dudas sobre su conveniencia, sobre todo por los elevados precios resultantes para el agua tratada, ya que al coste de la desalinización se añade el precio de mercado del agua a tratar que en general tiene poca relación con su calidad.

Desde el punto de vista del recurso, con la desalinización, este no solo no aumenta sino que merma ya que se produce un rechazo mínimo del 15% en forma de salmuera que debe conducirse y verterse de forma adecuada para evitar contaminación. Por otra parte, se trata de actuaciones que podrían estimular la sobreexplotación de los acuíferos, ya que el deterioro de su calidad no sería penalizado por el mercado al ofrecer la posibilidad de ser corregido a cuenta del consumidor agrario.

Por todo ello, la contribución de las EDAS a la sostenibilidad del regadío resulta muy cuestionable y, en principio, estas actuaciones no serán priorizadas en el Plan de Regadíos de Canarias. Caso diferente es el de la desalinización de las aguas depuradas, dentro del conjunto de tratamientos necesarios para la regeneración de esta agua, a fin de posibilitar el uso de este nuevo recurso.

### **C) La utilización de nuevos recursos para regadío**

De los balances hídricos disponibles se puede establecer que, salvo en las islas de La Palma, La Gomera y El Hierro, los acuíferos insulares están sobreexplotados y continúan disminuyendo al ser las extracciones superiores a la recarga. Por tanto, parece conveniente para la sostenibilidad del regadío en Canarias, favorecer la utilización de nuevos recursos hídricos, incluyendo los no convencionales, tecnológicamente disponibles, como las aguas desaladas de mar obtenidas en las EDAM y las aguas regeneradas.

Salvo casos excepcionales, la captación de nuevos recursos hidráulicos convencionales no se hará con fines exclusivos de regadío. La tendencia expresada en los diversos Planes Hidroló-

gicos Insulares es el manejo integral de los recursos y su distribución atendiendo a satisfacer las diversas demandas. Por ello, la mayoría de las actuaciones que se refieren a la captación de nuevos recursos, salvo, tal vez, las que se refieren a la captación de recursos hídricos superficiales en las balsas de riego, no parece que deban ser incluidos en un programa específicamente agrario como el Plan de Regadíos de Canarias.

Sin embargo, en las islas con mayores recursos hídricos subterráneos que se producen de forma casi continua a lo largo del año frente a una demanda agrícola variable, es obligado contar con una importante capacidad de regulación para evitar que los excedentes invernales se desperdicien bien en un exceso de riego o con vertidos al mar. Por ello, la construcción de balsas que permitan la regulación de los caudales alumbrados puede considerarse como una actuación que aporta nuevos recursos y viene a complementar la actuación de los particulares que a un coste muy superior han venido dotándose de depósitos de forma individual. En este mismo sentido se puede mencionar el cierre de galerías.

Así mismo, el Plan contempla con el máximo interés aquellas actuaciones que permitan el uso agrario de recursos no convencionales, como las aguas regeneradas y la desalación del agua del mar.

#### *Las aguas regeneradas*

La regeneración de las aguas residuales urbanas puede poner a disposición del sector agrario un importante volumen de agua en las áreas próximas a las ciudades y zonas turísticas. Por otra parte, las actuaciones para la reutilización en regadío de estas aguas, aconsejan por razones sanitarias la construcción de redes a presión independientes, lo que puede permitir en muchos casos un manejo integral, tecnológicamente avanzado, de estas aguas y de los recursos actuales, convirtiéndose así, simultáneamente, en actuaciones de modernización y mejora de eficiencia del regadío.

Debe señalarse, no obstante, que aunque estas actuaciones se vienen propiciando desde los años ochenta y aparecen recogidas ya en los primeros Planes Hidrológicos aprobados en Tenerife y Gran Canaria en la década de los 90, el uso de éstas aguas no solo no ha aumentado al ritmo que se esperaba sino que incluso en algunos casos ha disminuido. En los trabajos de caracterización de los regadíos insulares realizados se ha puesto de manifiesto el descontento de los usuarios respecto a la aptitud de esta agua para el uso agrícola, tanto por lo que respecta a la calidad química como a la sanitaria, así como por el precio. Por ello, si se quiere que la reutilización de aguas regeneradas alcance una cifra significativa en Canarias los Planes Hidrológicos deben asumir una actuación decidida no sólo en la mejora de las infraestructuras de depuración sino en actuaciones de riguroso control de los vertidos a la red de alcantarillado que las abastece. Debe tenerse en cuenta que no sólo es necesario cumplir la normativa establecida en el Real Decreto 1620/2007, sino que gran parte de las explotaciones de regadío intensivo están acogidas a certificaciones de carácter voluntario (ISO, EUROGAP, etc.) exigidas por los principales operadores del sector distribuidor de productos alimentarios, cuyos estándares son aun más rigurosos que la normativa oficial.

### *La producción de agua desalada de mar*

En un ámbito insular la desalación de agua de mar supone una oportunidad para aumentar los recursos hídricos convencionales, especialmente en aquellas islas en que estos no pueden satisfacer la demanda, no sólo la agraria sino incluso la urbana. La experiencia en el uso de esta tecnología es muy amplia en Canarias y los avances habidos en los últimos años suponen una mejora considerable de los procesos que ha permitido pasar de un consumo superior a los 6 kWh/m<sup>3</sup> de agua producida a menos de los 3 kWh/m<sup>3</sup> con el consiguiente abaratamiento del producto. Esto ha resultado en que el precio del producto resultante sea actualmente comparable con el de los recursos convencionales, de calidad notablemente inferior, con lo que comienza a ser un producto atractivo para la agricultura intensiva. Los avances tecnológicos que se esperan a corto plazo no sólo de la tecnología de desalación sino de su combinación con la producción de energías renovables, aumentan la sostenibilidad de su uso para regadío y hace prever un incremento de su uso agrario en el próximo decenio.

Por ello, a diferencia de las EDAS, la utilización de agua procedente de la desalación de agua de mar (EDAM) que en principio parecía fuera del ámbito agrícola por sus elevados costes, y poco sostenible por sus requerimientos energéticos, se ha contemplado en este Plan a siete años, en determinados casos, especialmente en las islas orientales.

### **D) Los Regadíos infradotados**

Las actuaciones establecidas hasta ahora han incidido sobre el objetivo de mejorar la competitividad de la agricultura, de especial importancia en el caso de la agricultura de regadío. Sin embargo, ya señalamos que entre los objetivos del nuevo FEADER 2014-2020 se recoge la restauración, preservación y mejora de la biodiversidad incluida en los sistemas agrarios de gran valor natural conformadores de los paisajes europeos. En este sentido, los documentos de trabajo para la reforma de la Política Agrícola Común (PAC) de la UE, establecen que la nueva PAC no será una política orientada únicamente a un sector económico, aunque esencial, de la economía de la UE, sino también una política de importancia estratégica para la seguridad alimentaria, el medio ambiente y el equilibrio territorial que aporte el valor añadido europeo de una verdadera política común.

Canarias, por su relieve y situación presenta un amplio abanico de condiciones edafo-climáticas diversas lo que unido a su papel histórico como lugar de parada en el tráfico marítimo tricontinental y especialmente en el que se realizó entre Europa y América, disfruta en sus agrosistemas de una biodiversidad agraria de las más ricas del mundo. Estos agrosistemas, que se localizan principalmente en las medianías de las islas con mayor relieve, configuran paisajes de excepcional belleza y conservan patrimonio y tradiciones rurales que forman parte de la identidad de los canarios.

Sin embargo, los mapas de cultivo muestran que estos agrosistemas se están abandonando, proceso que viene provocado básicamente por:

- La falta de rentabilidad de la agricultura que la convierte en actividad económica poco atractiva.
- El envejecimiento de la población rural y falta de relevo generacional al tratarse, por las razones expuestas en los apartados anteriores, de una actividad que no atrae a los jóvenes del medio rural, que hasta ahora han venido encontrando en el sector terciario, en especial el turismo y la construcción, una salida más adecuada a sus aspiraciones.
- Las dificultades económicas de estas explotaciones para su continuidad, en especial para el riego y la mecanización que harían más rentable y menos duro el trabajo en las mismas. Estas dificultades se deben principalmente a la escasa dimensión de las explotaciones y de los bancales, pero también a la falta de rentabilidad que hace poco interesantes nuevas inversiones.

El efecto directo del abandono agrícola es el rápido deterioro del paisaje. En zonas áridas, la falta de mantenimiento de los muros y taludes favorece los procesos de desertificación, provoca el desmoronamiento de las paredes de los bancales, de la antigua infraestructura de regadío y de otros elementos patrimoniales, con la consiguiente pérdida de suelo. En las áreas húmedas, la colonización del suelo por arbustos invasores y la erosión hídrica desestructura el paisaje y aumenta el riesgo de incendios forestales.

Otra consecuencia detectada por los estudios sociodemográficos de las áreas rurales es el despoblamiento de determinadas áreas de las islas con los consiguientes efectos de desestructuración y desequilibrio territorial

En cuanto a la seguridad alimentaria, otro de los objetivos establecidos por la PAC, en la actualidad la contribución de las producciones locales, exceptuando los productos de exportación, al consumo agroalimentario regional se estima en torno a un 10%, cifra muy lejana a los estándares recomendados por los organismos internacionales y que de no corregir la actual tendencia puede continuar su descenso.

Por ello, el Plan contempla actuaciones en aquellos regadíos de medianías que aun mantienen en cultivo un cierto número de explotaciones a cuyo frente cuentan con agricultores profesionales y que en su conjunto conforman una superficie mínima, un agrosistema, en el que la mejora del regadío pueda, aun con la disponibilidad de recursos actuales, contribuir significativamente a su consolidación. Se contemplan, en especial, los casos en que se carecen de la infraestructura necesaria para recibir la dotación de agua que precisan tanto en regulación como en distribución.

### **E) Nuevos regadíos**

La puesta en regadío de nuevas superficies, es un tipo de actuación que salvo casos excepcionales vinculados al objetivo de conservación de los agrosistemas y del medio rural, no será priorizado en el Plan de Regadío de Canarias por entender que los regadíos más interesantes

tanto por la productividad de las tierras a regar como por los costes, ya han sido construidos, con lo que, como criterio general, las zonas que aun no están en regadío tienen menor interés agrícola y/o demandarían una alta inversión, así como por razones de sostenibilidad de los recursos hídricos. Por todo ello, esta es una actuación que de forma genérica se califica con la más baja prioridad. No obstante, el Plan puede contemplar actuaciones muy básicas en el caso de aquellos agrosistemas de secano que en determinados años de escasa pluviometría necesiten de riegos de apoyo para que lleguen a buen fin.

## 5. LA EVALUACIÓN DE LAS ACTUACIONES

La evaluación de las actuaciones contempladas en el Plan, agrupadas según las anteriores líneas de actuación, tiene por objeto aportar criterios cuantitativos que complementen a los cualitativos para poder priorizarlas o, en algunos casos en el que los indicadores así lo aconsejen, excluirlas del Plan.

A la vista de la dificultad que supone aplicar a un plan de esta naturaleza, sin disponer de todos los proyectos específicos, los índices más estandarizados de evaluación financiera y económica, se han utilizado criterios de inversión, conservación de recursos, gasto de energía, productivos y sociales. Los índices determinados según las líneas de actuación son:

### A) Mejora de la eficiencia de los actuales regadíos

- Inversión (€) / Volumen ahorrado de agua ( $m^3/año$ ): se realiza este índice con las necesidades hídricas de la superficie cultivada en regadío.
- Inversión (€) / Volumen ahorrado de agua en el futuro ( $m^3/año$ ): además de la superficie cultivada, se considera que con la puesta en funcionamiento de la actuación se amplía el regadío a toda la superficie cultivada y se recupera el abandonado reciente.

### B) Mejora de la calidad de los recursos disponibles

- Inversión (€) / Volumen de agua mejorado ( $m^3/año$ ): se tiene en cuenta la reducción del volumen de la demanda al disminuir la fracción de lavado

### C) Utilización de nuevos recursos para regadío

- Inversión (€) / Volumen de agua regulado, captado o generado ( $m^3/año$ ): En el caso de los depósitos, balsas o presas que solo actúen de cabecera de redes de distribución, se calcula el índice con el volumen regulado necesario para cubrir las demandas hídricas de los cultivos beneficiados por la red. Si las anteriores infraestructuras de almacenamiento captan nuevos recursos, se considera el volumen medio anual de esorrentía de la cuenca. Igual tratamiento se lleva acabo con los azudes. Las con-

ducciones de transporte e impulsiones generan nuevos recursos en los regadíos deficitarios en función de su demanda o volúmenes anuales disponibles. En los cierres de galerías se calcula con el volumen anual de extracción que es capaz de regular el cierre.

D) Regadíos infradotados

- Inversión (€) / superficie mejorada (ha): la superficie mejorada es la del ámbito de influencia de la actuación.

E) Nuevos regadíos

- Inversión (€) / superficie puesta en riego (ha): considera la nueva superficie bajo riego.
- Inversión (€) / UTA generada: se sigue los módulos de unidades de trabajo agrario (UTA) de la orden de 10 de febrero de 2.010, por la que se aprueban las bases reguladoras de la concesión de determinadas subvenciones previstas en el marco de del Programa de Desarrollo Rural de Canarias FEADER, para el periodo de programación 2.007-2.013.

## METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA POSIBLE EXISTENCIA DE AIRE EN EL SUMINISTRO DE AGUA EN LAS ZONAS ATENDIDAS POR TEIDAGUA S.A. APLICACIÓN DE LAS MISMAS Y CONCLUSIONES.

Carmelo Militello Militello. Dpto. de Física Fundamental Experimental Electrónica y Sistemas. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil e Industrial, Universidad de La Laguna.

*carmelomilitello@gmail.es*

Sergio Rodríguez Buenafuente. Dpto. de Física Fundamental Experimental Electrónica y Sistemas. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil e Industrial, Universidad de La Laguna.

*srbuenaf@ull.es*

Viana L. Guadalupe Suárez. Dpto. de Física Fundamental Experimental Electrónica y Sistemas. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil e Industrial, Universidad de La Laguna.

*vlsuarez@ull.es*

María Teresa Arencibia Pérez. Dpto. de Física Fundamental Experimental Electrónica y Sistemas. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil e Industrial, Universidad de La Laguna.

*mtarenci@ull.es*

Juan Carlos Guerra García. Dpto. de Física Básica. Facultad de Física. Universidad de La Laguna.

*cguerra@ull.es*

**RESUMEN:** Se propone una metodología para determinar el volumen de aire en las tuberías de las líneas de abastecimiento de agua potable en los municipios de San Cristóbal de La Laguna y Tacoronte de la provincia de Santa Cruz de Tenerife. En la actualidad el mantenimiento y servicio de dichas líneas son competencia de la compañía Teideagua S. A. El procedimiento planteado permite cuantificar la cantidad de agua facturada respecto al contenido de aire que pueda existir en el interior de las tuberías. Dicho procedimiento se basa en la Normativa ME-008 del Centro Español de Metrología. En este estudio se plantea medir el volumen de aire que se encuentra en forma de burbujas o microburbujas a partir de su peso que se encuentran mezcladas con el agua. Para ello se diseña un sistema de medida equipado con un depósito de 120 litros, una balanza de 160 de capacidad de carga y una tubería de control provista de un manómetro, un caudalímetro integrador electrónico y otro mecánico y varias válvulas esféricas para regular el caudal. Dicha tubería o tren de medida se conecta a la línea de abastecimiento y tras regular el caudal a 500 m<sup>3</sup>/h se llena el depósito con agua hasta que el peso total alcance los 100kg. La diferencia entre la cantidad de agua registrada por el caudalímetro y el peso estimado por la balanza establece la cantidad de agua facturada con respecto a la cantidad real de agua suministrada.

### 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los inconvenientes que supone la presencia de burbujas de aire en el caudal del suministro de agua es la fracción de la cantidad de agua facturada respecto de la cantidad real

consumida por el usuario. En la actualidad, los caudalímetros son los instrumentos utilizados en la facturación para determinar el consumo total de agua en viviendas y recintos públicos. Estos medidores tienen integrado un contador electrónico o mecánico a partir del cual se mide el volumen de agua que se consume. Los contadores electrónicos proporcionan en cada instante de tiempo el valor del caudal, en cambio los mecánicos registran el consumo a partir del almacenamiento de una serie de vueltas o pulsos equivalentes a una proporción del volumen.

Debido a la existencia de aire atrapado en las tuberías y cañerías de agua éste puede encontrarse en forma de burbujas o microburbujas mezcladas con el agua potable del suministro. Dichas burbujas dentro del caudal aumentan de volumen cuando quedan expuestas a la presión atmosférica en un factor igual a la relación de presiones si el cambio es isotérmico. Ciertas burbujas pueden alcanzar un tamaño crítico que les permitirá ascender hasta la superficie y otras pueden quedar en suspensión. El volumen de burbujas en suspensión es difícil de predecir y puede llegar a falsear el volumen medido.

La metodología propuesta en este estudio consiste en cuantificar el peso del volumen de aire existente en una línea de suministro a partir de un volumen mínimo de agua extraído de la misma. Este procedimiento concuerda con la Normativa ME-008 que utiliza el Centro Español de Metrología en el “Procedimiento para la calibración de caudalímetros de líquidos mediante método gravimétrico” y que indica el Ministerio de Industria para la calibración de caudalímetros.”

## **2. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO**

Los problemas que surgen cuando se quiere medir el volumen de agua consumido por el usuario son los siguientes:

- 1) El instrumento de medida debe tener una precisión mayor que el caudalímetro empleado por la empresa para medir el volumen de agua facturado.
- 2) La selección del caudal debe ser el apropiado para la realización de las medidas
- 3) El volumen de agua mínimo necesario para obtener una medida representativa del volumen de burbujas en el supuesto de que existiesen.
- 4) Diseñar una metodología que permita garantizar la repetitividad de las mediciones.

### **2.1. Selección del caudal para realizar las medidas**

El caudalímetro seleccionado para el estudio es del mismo tipo que el que se encuentra instalado en las viviendas y que registra el volumen de agua que se factura. Este caudalímetro es de Clase C y presenta un error de  $\pm 5\%$  por debajo de su caudal crítico ( $22.5 \text{ l/h} = 0.022 \text{ m}^3/\text{h}$ ) y  $\pm 2\%$  por encima del mismo. La selección del caudal máximo de medida fue de  $500 \text{ m}^3/\text{h}$

que coincide con el caudal con el que mayor precisión trabaja el caudalímetro de Clase C. La ventaja de trabajar con un caudal alto garantiza que el aire sea arrastrado hacia el exterior.

### **2.2. Medida del volumen facturado**

Se propone para realizar el estudio un volumen mínimo de 100 litros. Se dispone de un recipiente cilíndrico con una base de 40 cm de diámetro y una capacidad de 120 litros. Se define un error de 0.1 cm en la medida de la altura del agua sobre la pared del recipiente que corresponde a un error en la medida del volumen de 0.13% en 100 litros.

### **2.3. Balanza de medida**

La balanza seleccionada soporta una carga máxima de 160Kg y opera con una precisión de 0.020Kg. El error instrumental es de 0.02% en 100Kg. Se realizó una calibración del error de la balanza para distintas inclinaciones de la misma ya que es necesario que la base se mantenga perpendicular a la fuerza de atracción gravitatoria para que trabaje con la máxima precisión. En la Tabla 1 se muestra el error porcentual para un peso de 100kg en función del ángulo de inclinación de la base de la balanza.

**Tabla 1;** Error porcentual en 100kg de agua en función del ángulo de la balanza con la vertical.

<b>Grados de inclinación</b>	<b>Error %</b>
0,5°	0
1°	-0.02
2°	-0.06
3°	-0.14
4°	-0.24

Se ha estimado experimentalmente que puede garantizarse una inclinación máxima de 1 grado con un error de 0,02% en 100Kg.

Teniendo en cuenta el error de precisión y el error en la inclinación, el error final en las mediciones con la balanza es como máximo de 0,04%.

### **2.4. Diseño del Tren de medida**

Se diseñó un instrumento para garantizar el régimen del caudal establecido en 500 m<sup>3</sup>/h y realizar las medidas del volumen de agua extraído de la línea de suministro. Se equipó una tubería con tres válvulas esféricas para regular el caudal, una en la entrada, una en la mitad y otra en la salida, un manómetro, un caudalímetro integrador electrónico y otro mecánico. Las funciones de cada uno de los componentes se describen a continuación:

- La Válvula esférica permite habilitar la circulación por el tren de medida.
- El manómetro mide la presión en el punto medio del tren, antes del caudalímetro de facturación.
- El caudalímetro integrador electrónico permite una visualización instantánea de caudal.
- El caudalímetro integrador mecánico, es similar a los instalados en las viviendas de los usuarios y la medida será tomada como base en la facturación.
- La válvula esférica se utiliza para regular el caudal que atraviesa el tren de medida.
- La válvula esférica se utiliza para interrumpir el flujo saliente del tren de medida.



**Figura 1;** Tren de medida. La carcasa azul corresponde al caudalímetro digital, la carcasa verde oscuro pertenece al caudalímetro de facturación y el manómetro se distingue por la carcasa metálica. (Militello, 2009)

La fotografía de la Figura 1 muestra los componentes del tren de medida. Se construyeron cuatro trenes de medidas y se estableció un procedimiento para la intercalibración de los mismos. Este procedimiento permitió verificar la precisión de las medidas de cada tren y garantizar el correcto funcionamiento de los mismos. Se midió los volúmenes determinados por los caudalímetros con respecto a los obtenidos con la balanza para los caudales de 400m<sup>3</sup>/h y 600 m<sup>3</sup>/h. Las medidas se repitieron dos veces para cada caudal. El error se calculó según la siguiente ecuación:

$$\text{Error \%} = (\text{Medido}/\text{Facturado} - 1) * 100$$

Los valores medidos junto con el error calculado para cada uno de los trenes se muestran en la Tabla 2. Se designan a cada uno de los trenes como H1, H2, H3 y H4. En la tabla se observa que los caudalímetros funcionan correctamente y que ninguno de los componentes presenta ningún defecto de fabricación u obstrucción ya que no se detecta un error superior

al indicado por la Clase C (+/- 2%). Los valores negativos del error en la tabla indican que se factura más de lo que se entrega.

**Tabla 2;** Intercalibración de los trenes de medida para dos muestreos.

Trenes de medida	H1	H2	H3	H4
<b>600 m3/h</b>				
<b>Medida 1</b>				
Facturado	100,3	102,4	101,72	101,48
Medido	99,74	101,94	100,2	100,32
Error%	-0,56	-0,451	-1,52	-1,16
<b>Medida 2</b>				
Facturado	97,05	100,74	99,04	101,2
Medido	97,1	100,28	97,88	99,92
Error%	0,05	-0,46	-1,18	-1,28
<b>400 m3/h</b>				
<b>Medida 1</b>				
Facturado	100,29	100,38	100,36	99,42
Medido	100,3	100,06	99,64	99,38
Error%	0,01	-0,32	-0,72	-0,04
<b>Medida 2</b>				
Facturado	100,22	100,26	99,24	101,32
Medido	99,94	99,66	98,68	100,2
Error%	-0,28	-0,60	-0,57	-1,12

### 3. PROCEDIMIENTO DE MEDIDA

El tren de medida se conecta a la línea de abastecimiento y a través de la llave de regulación se fija el caudal en 500m<sup>3</sup>/h. A continuación se anota la presión del flujo y se llena el depósito hasta que la balanza indique un peso de 100kg. Se registra dicho peso y se anota la medida del caudalímetro mecánico y digital. Se calcula la diferencia entre la cantidad de agua que registra los caudalímetros y la que indica la balanza. Esta medida corresponde con la diferencia entre la cantidad facturada y la cantidad real de agua. En la Tabla 3 se muestra el protocolo de medidas que garantiza la repetitividad de dicho procedimiento en cada punto de la red. Las medidas se realizaron dos veces para garantizar dicha repetitividad de los resultados. Hay que señalar que en algunos puntos la tubería había permanecido mucho tiempo inactiva y fue necesario permitir la circulación del agua durante unos veinte minutos antes de empezar el procedimiento de medida. La Figura 2 muestra el montaje y los componentes del equipo de medida.

N° Pasos	Descripción del procedimiento
1	Localizar el sitio en el que se hará la medida, observando la accesibilidad del mismo para la instalación del equipo y el equilibrado correcto de la balanza.
2	Instalar y equilibra la balanza teniendo cuidado que la burbuja del nivel no salga de los límites indicados en el mismo. El equilibrado debe hacerse en dos direcciones perpendiculares. Será admisible que media burbuja se desplaza de los límites del nivel.
3	Cerrar la conexión de agua anterior al caudalímetro instalado en el sitio de medida.
4	Desconectar el caudalímetro instalado para que el volumen controlado no le sea facturado al usuario.
5	Conectar el tren de medida a la línea de abastecimiento, cuidando que el tren de medida quede en posición horizontal y que los caudalímetros en el mismo no queden ladeados.
6	Abrir las llaves del tren de medida para permitir el flujo libre a través del mismo.
7	Utilizar la llave de regulación para ajustar el caudal deseado a 500 m <sup>3</sup> /h (+/- 50 m <sup>3</sup> /h).
8	Cerrar la válvula esférica final.
9	Conectar el tren de medida al depósito acumulador.
10	Abrir la válvula esférica final y llenar parcialmente el depósito, verificando que el valor de caudal regulado se mantiene. En el depósito deben acumularse aproximadamente 10 litros para realizar una precarga de la balanza.
11	Cerrar la válvula esférica final del tren.
12	Tarar la balanza a cero.
13	Anotar la medida de la presión indicada en el manómetro, que al no circular agua es estática.
14	Obtener fotografías del montaje completo.
15	Registrar la medida actual del caudalímetro de tarifado.
16	Abrir suavemente la válvula esférica.
17	Cuando la balanza indique 50 kg o una medida cercana se vuelve a tomar el valor indicado por el manómetro, en este caso la medida será dinámica.
18	Cuando la balanza indique un valor próximo a los 100 kg se cierra la válvula esférica de salida del tren de medida.
19	Registrar el peso final indicado por la balanza.
20	Registrar la medida del caudalímetro.
21	Fotografiar la medida del caudalímetro.

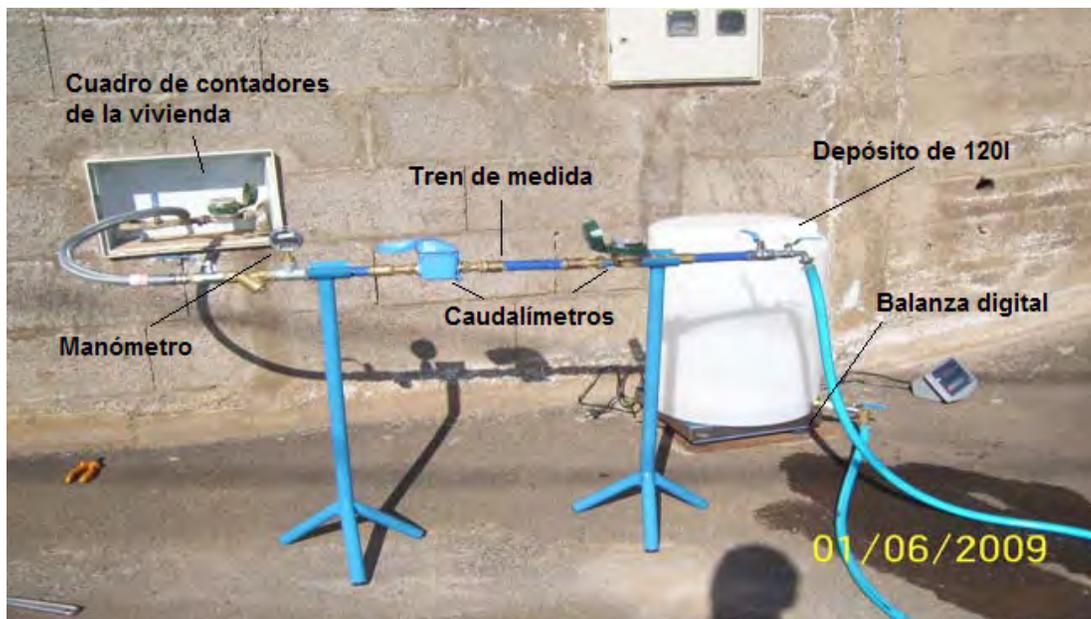


Figura 2; Montaje del equipo de medida. Nótese el depósito sobre la balanza (Militello, 2009)

#### 4. SELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE MEDIDA

La red de suministros de la empresa Teideagua S. A abarca los municipios de Tacoronte y San Cristóbal de La Laguna. La orografía, la dispersión de las viviendas en las poblaciones rurales, los distintos diámetros de las tuberías que conforman la red, impiden establecer un criterio para definir la selección de los puntos del muestreo. Debido a esto se decidió ajustar los resultados obtenidos a una distribución normal. En las zonas poco pobladas se decidió tomar al menos tres muestras por tanque o depósito de distribución, una cercana al tanque, una en un punto medio y otra al final del ramal de distribución.

Se seleccionaron en total 17 poblaciones entre los dos municipios. La distribución de los puntos de medida se muestra en la Figura 3. En la imagen del plano se observan zonas en las que existe mayor una densidad de puntos, esto es debido a que se trata de una región abastecida por dos tanques.

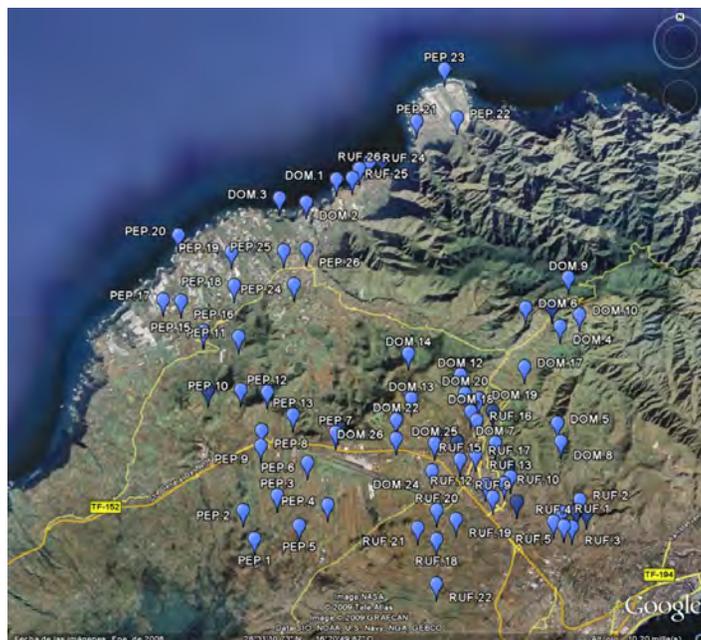


Figura 3; Distribución de puntos sobre los municipios de Tacoronte y San Cristóbal de La Laguna (Teideagua, 2009)

## 5. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

El total de puntos medidos fueron setenta. La Figura 4 representa los errores porcentuales en la facturación para la primera y segunda medida. Los valores quedan comprendidos entre el -3% y el 4%. Los valores positivos indican que se factura menos de lo que se suministra.

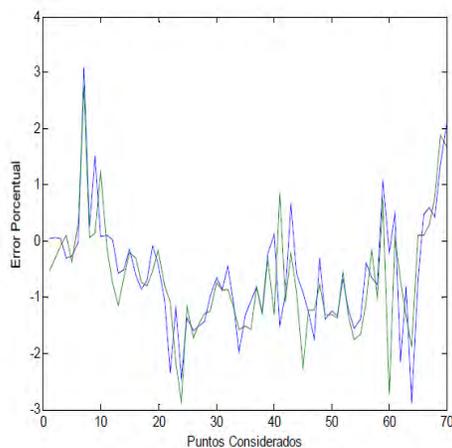


Figura 4. Errores en la facturación. Muestra 1 en azul. Muestra 2 en verde.

Figura 4; Errores en la facturación. Muestra 1 en azul, muestra 2 en verde (Militello, 2009)

Los valores de los errores ordenados de menor a mayor se representan en la Figura 5. Se observa que la diferencia entre ambos muestreos es pequeña, ver Figura 5a y 5b. Para determinar si los valores obtenidos en el muestreo pueden ajustarse a una distribución normal se realiza un test de normalidad (Matlab). Los gráficos de la Figura 6 muestran los resultados del test aplicados a los datos para la primera y segunda toma de datos. El ajuste permite definir una recta entre los percentiles 0.25 y 0.75.

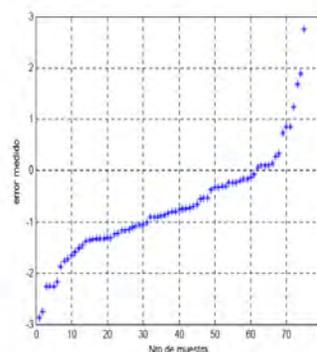
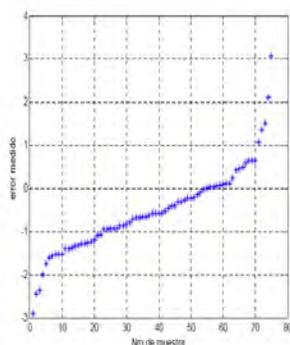


Figura 5. Errores medidos en la primera toma de muestra ordenados de menor a mayor.

(a)

(b)

**Figura 5;** La figura a) representan los errores calculados para la primera toma de datos y la figura b) son los valores de la segunda medida. (Militello, 2009)

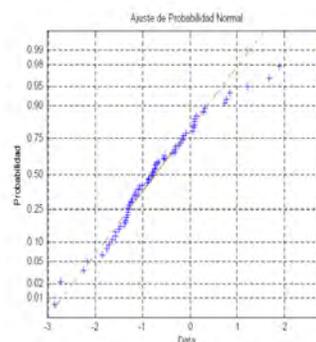
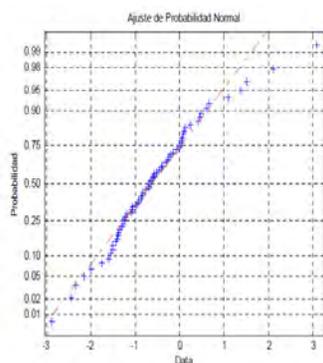


Figura 7. Test de normalidad para las primeras muestras.

Figura 8. Test de normalidad para la segunda toma de muestra

(a)

(b)

**Figura 6;** La figura a) test de normalidad para la primera toma de datos y la figura b) es el resultado del test sobre la segunda medida. (Militello, 2009)

La calidad de la distribución normal obtenida se evalúa en función de la aproximación de los puntos sobre la recta representada. En los gráficos (a) y (b) de la Figura 6 se observa que menos de un 10% de los puntos muestreados no se ajustan a dicha recta. Este resultado permite concluir que la distribución normal propuesta sobre los datos es acertada.

Las desviaciones estándar calculadas para la primera y segunda toma son respectivamente -0.58 y -0.68. Se observa que la variabilidad entre ambas es pequeña por lo que el muestreo es fiable.

Respecto al número de datos utilizados en la primera toma de este estudio, según las desviaciones estándar calculadas, se estima que para cualquier otro muestreo realizado el valor medio estaría entre -0.82 y -0.34 con una confianza del 95%, es decir, de 100 muestras, 95 presentarían una media entre los valores citados. Asumiendo que la variabilidad de la media está en el orden del 0.5%, el número de muestras utilizados en el presente estudio es adecuado.

Para los valores obtenidos en la segunda toma, se puede afirmar que con la misma cantidad de muestras presenta un valor medio entre -0.92 y -0.44 con un 95% de confianza. Se observa que esta segunda muestra tiene la misma variabilidad que la anterior.

Estos resultados permiten concluir que la repetitividad en el procedimiento de medidas es correcta y el protocolo propuesto es efectivo en el control del procedimiento de adquisición de las muestras.

Las gráficas de la Figura 6 muestran que para que se produzca un error negativo en la facturación superior al 2% es del 7% y para que exista un error negativo superior al 3% tiene que tener una probabilidad inferior al 0.5%. Esto indica que la probabilidad de facturar con un error entre -2 y -3% es del 6,5%. La posibilidad de encontrar un error negativo mayor de -5%, es decir -6% o -9%, es insignificante.

## 6. CONCLUSIONES

El estudio realizado muestra que partiendo del error instrumental según la Clase C del caudalímetro utilizado en las medidas, se asume un error del -2% para un caudal crítico o de transición de 22.5l/h. Por lo que cualquier error por encima de este puede imputarse, entre otras causalidades, a la existencia de aire en las tuberías. Debido a la precisión del instrumento no es posible definir el problema para errores porcentuales entre el -2% y el 2%.

El “REGLAMENTO DEL SERVICIO DE ABASTECIMIENTO DE AGUAPOTABLE EN EL TÉRMINO MUNICIPAL DE SAN CRISTÓBAL DE LA LAGUNA”, Boletín Oficial de la Provincia de Santa Cruz de Tenerife, núm. 35, del lunes 15 de marzo de 2004, Artículo 31, indica que la diferencia entre el suministro del volumen de agua facturado y el volumen suministrado puede ser como máximo +/-5%. Los resultados del estudio realizado muestran que la probabilidad de realizar una facturación con un error superior al 3% atri-

bible a la presencia de aire es inferior al 0.5% y la probabilidad de cometer un error en el volumen superior al 5% es del 0.001%.

#### **AGRADECIMIENTOS**

Este estudio fue posible gracias al trabajo de campo que se realizó con los operarios de la empresa de Teideagua S. A.

#### **REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA**

MATLAB, The Language of Technical Computing, Version R2008b.



# **PARTE 3**

Nuevas tecnologías,  
Depuración y  
Calidad de aguas



## CALIDAD DE LAS AGUAS DE RIEGO EN ZONAS VOLCÁNICAS PARA UN MANEJO INTEGRADO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

José Manuel Hernández-Moreno. *Dpto. de Edafología y Geología. Univ. de La Laguna.*  
*jbmoreno@ull.es*

María del Pino Palacios-Díaz. *Dpto. de Patología Animal, Producción Animal y Ciencia y Tecnología de los Alimentos. Univ. de Las Palmas de Gran Canaria.*  
*mpalacios@dpat.ulpgc.es*

**RESUMEN:** En zonas áridas y semiáridas, el manejo integrado de los recursos hídricos es esencial para su aprovechamiento óptimo. En este capítulo se describen los aspectos más relevantes de la calidad de las aguas convencionales de las Islas Canarias, así como de las aguas desaladas y regeneradas. La disponibilidad de diferentes calidades de agua para el riego representa una oportunidad de combinarlas para corregir los efectos negativos de algunas propiedades como la salinidad, y puede complementar el empleo de otras estrategias como el manejo del riego y el tipo de cultivo. En este sentido se describen algunas experiencias llevadas a cabo en Canarias. Asimismo, se estudian casos que ilustran las propiedades particulares de algunos suelos volcánicos que requerirían adaptar las guías generales de calidad del agua de riego a los suelos canarios.

### 1. INTRODUCCIÓN

La interacción de las aguas con rocas y suelos volcánicos presenta aspectos característicos en relación con otros contextos litológicos. Esto se debe principalmente a las propiedades físicas y reactividad de muchos materiales y suelos volcánicos que van a incidir en las propiedades hidráulicas y composición de las aguas en estos sistemas.

Por otra parte, las particularidades de muchos suelos volcánicos determinan que los criterios generales de calidad de las aguas de riego no sean siempre aplicables en las Islas Canarias. Por ejemplo, en el antiguo Plan Hidrológico Insular de Tenerife de 1989 se puede leer: “... *Las características de nuestros suelos deben dulcificar los tipos de calidades de agua de riego o de lo contrario ya deberían haberse arruinado nuestras parcelas y los cultivos en ellas establecidos...*” en referencia a la insensibilidad a la degradación por sodificación en algunos tipos de suelos canarios. También se propone en dicho documento la necesidad de adaptar los estándares de agua de riego a las peculiaridades de algunos suelos canarios.

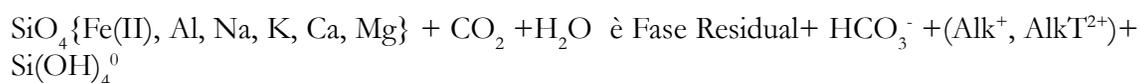
En este capítulo se destacan en primer lugar las características más relevantes de las aguas de riego en las Islas Canarias, tanto las aguas convencionales como las regeneradas y desalinizadas. A continuación se estudian algunos casos que proporcionan datos del impacto del

riego con diferentes calidades de aguas, destacando las propiedades únicas de algunos tipos de suelos volcánicos. Estas experiencias serán muy valiosas a la hora de definir la calidad de las aguas de riego en un contexto del manejo integrado de los recursos hídricos.

## 2. LA CALIDAD DE LAS AGUAS DE RIEGO EN LAS ISLAS CANARIAS

### 2.1. Aguas Subterráneas

Las aguas subterráneas en Canarias muestran un amplio abanico de calidad, ya que su composición está determinada por una gran número de factores naturales (pluviometría, evapotranspiración, tipos de roca) y artificiales (intrusión marina y retornos de riego). En general, la hidrólisis de los silicatos constituyentes de las rocas volcánicas va a determinar la composición de las aguas subterráneas:



*Donde*  $\text{Alk}^\pm$  :  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$   $\text{AlkT}^{2\pm}$ :  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$

La Fase Residual, insoluble, está constituida por minerales de arcilla y oxi-hidróxidos (Fe, Al, Mn,..) en una composición que depende principalmente de la geoquímica de la roca original, la velocidad de percolación del agua, tiempo de residencia y concentración de  $\text{CO}_2$ . El aporte de  $\text{CO}_2$  de origen endógeno también es variable, siendo mayor en las islas más modernas y muy residual en las antiguas.

Las aguas resultantes de estos procesos de alteración son generalmente inestables cuando se transportan, por pérdida de  $\text{CO}_2$  (y consiguiente incremento del pH) y variaciones de temperatura, lo que ocasiona una precipitación selectiva de carbonato de calcio. Este comportamiento explica que la composición de las aguas subterráneas de las Islas Canarias oscile principalmente entre los tipos bicarbonatada sódica y bicarbonatada magnésica (Custodio, 1978). La concentración en sales solubles es muy variable, aunque tiende a aumentar en las zonas costeras, de forma que las aguas tienen a ser cloruradas sódicas. Este fenómeno puede producirse por la existencia de fenómenos de sobreexplotación y/o contaminación por retornos de riego o ser natural en zonas áridas por las características salinas del agua de recarga (Custodio y Cabrera, 2002). Por otra parte, los contenidos de sílice son generalmente elevados, lo que ocasiona problemas con las membranas de ósmosis inversa en los procesos de desalación de aguas subterráneas.

### Consecuencias para el riego

La alcalinidad de las aguas, junto con valores del RAS (relación de adsorción de sodio) generalmente elevados representa un riesgo de reducir la permeabilidad en los suelos debido a fenómenos de hinchamiento y dispersión que provoca el aumento de la doble capa eléctrica

en los suelos sódicos. Este riesgo se agrava por las ratios  $\text{Ca/Mg} < 1$  (molar) que presentan generalmente las aguas de galerías. El magnesio, que se incluye en la fórmula del RAS al atribuírsele un comportamiento similar al del calcio, tiene, sin embargo, cierto carácter dispersante y algunos trabajos describen que el Mg tiene una influencia negativa que acentúa las malas propiedades físicas de los suelos sódicos. El “riesgo de Mg” se utiliza en algunos países como Australia y Canadá.

El efecto negativo de la alcalinidad/sodicidad de las aguas se compensa al aumentar la salinidad (que contrarresta los fenómenos de hinchamiento y dispersión de los coloides del suelo ya que el espesor de la doble capa eléctrica se reduce al aumentar la concentración salina del medio). En consecuencia, en las guías de calidad de agua de riego se combinan el RAS y la conductividad eléctrica (CE) para valorar el riesgo de reducción de permeabilidad.

## **2.2. Recursos hídricos no-conventionales**

### **2.2.1. Aguas Desaladas (AD)**

Son aguas cloruradas sódicas. Las aguas que se utilizan para el riego en Canarias presentan un nivel de salinidad que oscila generalmente entre 0,7 y 1 dS.m<sup>-1</sup>. Las aguas desaladas se encuentran subsaturadas respecto al carbonato cálcico, por lo que son aguas corrosivas que presentan índices de Langelier negativos. Aunque los valores de RAS son elevados, tienen una baja alcalinidad, por lo que el riesgo de impermeabilidad es menor que en el caso de las aguas subterráneas. Los contenidos de Boro implican un riesgo de producir fitotoxicidad en los cultivos sensibles. El riego continuado con estas aguas puede provocar desequilibrios de nutrientes en los cultivos (Yermiyahu et al., 2007).

### **2.2.2. Aguas Regeneradas (AR)**

La composición de estas aguas presenta generalmente la huella del agua de procedencia (convencional o desalada). Además, contienen un mayor contenido en sales, nutrientes (N, P, K, micronutrientes) y turbidez, en parte asociada a materia orgánica. Por otra parte, la salinidad del agua regenerada no se puede interpretar directamente de las tablas de pérdidas de rendimiento de los cultivos en función de la conductividad eléctrica del agua, ya que en dichas tablas se supone que la sal predominante es el cloruro sódico, mientras que en el agua regenerada la contribución de los nutrientes es significativa. Por ello, la interpretación, si se corrige el abonado (deduciendo los nutrientes aportados por el agua regenerada) puede ser menos limitante. Se destaca también que algunos nutrientes como P y, especialmente B, pueden presentarse en formas orgánicas. La variabilidad temporal de la calidad de las AR dificulta establecer recomendaciones de uso. El Real Decreto 1620/2007 por el que se establece el régimen jurídico para la reutilización de aguas depuradas presenta en su Anexo I los criterios de calidad para la utilización de aguas regeneradas según los usos de la misma, con la consideración de mínimos obligatorios exigibles. El incumplimiento de los criterios de calidad del RD2007 no es un hecho infrecuente, lo que pone de manifiesto que, además del interés

económico, desde un punto de vista ambiental es más deseable la reutilización agrícola de las AR que su vertido a los cauces o al mar.

### **2.3. Nuevos criterios para definir la calidad de las aguas de riego**

La demanda creciente de producir más alimentos con menos agua implica la necesidad de una mayor eficacia del riego y el uso de aguas recicladas de más baja calidad. Como herramienta para evaluar la calidad del agua para el riego, se han desarrollado guías por un número de países y organizaciones internacionales como la FAO (Ayers y Westcott, 1976 y 1985, Westcot, 1997). Estas guías normalmente contienen valores umbral basados en determinados criterios, como el rendimiento óptimo de cosechas, calidad de las mismas, adecuación del suelo y mantenimiento de los equipos de riego. Otros tipos de guías están disponibles para otros sectores como el del agua de consumo humano (WHO, 2011) o el sector ambiental (USEPA, 2004). Con el aumento de la escasez de agua y la reconsideración de los recursos hídricos en el contexto del manejo integrado de los mismos, se hace necesaria la revisión de las diferentes guías sectoriales de calidad del agua (Jensen et al., 2001). Estos autores introducen los principios de riesgo y de sostenibilidad (Jensen et al., 2001). En la última década se han propuesto criterios de calidad del agua de riego para *metales y metaloides* considerando la duración del riego y la capacidad de retención de los suelos. En este sentido, se han definido concentraciones límite a largo (CLP) y corto plazo (CCP) (ANZECC y ARMCANZ, 2000; USEPA, 2004). La **CLP** es la concentración máxima admisible (expresada en mg/L) de contaminante en el AR que puede tolerarse asumiendo **100 años** de riego. La **CCP** es la concentración máxima (mg/L) tolerable a cortos periodos de riego (**20 años**), asumiendo la misma tasa de acumulación que para CLP. Estas concentraciones se han definido para minimizar la acumulación de contaminante en el periodo de riego, pero también para prevenir la toxicidad directa. Cuando CLP = CCP, prevalece el riesgo de toxicidad directa más que la acumulación (ej. litio en cítricos).

Los máximos recomendados para "*largo plazo*" se han establecido de forma conservadora para incluir suelos arenosos, con baja capacidad de secuestrar o eliminar contaminantes (USEPA, 2004). Estos máximos se encuentran por debajo de las concentraciones que producen toxicidad en las plantas más sensibles cuando crecen en disoluciones nutritivas o cultivos en arena a los que se ha añadido contaminante.

Los criterios para "*corto plazo*" se recomiendan para suelos neutros o alcalinos de textura fina, con alta capacidad para inactivar los diferentes elementos contaminantes.

Los valores de CCP y CLP son muy similares en las diferentes guías (ANZECC, 2000, USEPA, 2004). En la Tabla siguiente se recogen algunos valores para varios elementos.

**Tabla 1.** Límites recomendados para constituyentes inorgánicos en AR para riego (selección adaptada de USEPA, 2004)

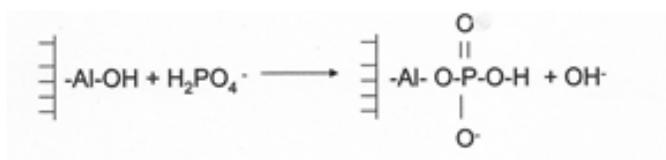
Constituyente	CLP (mg/L)	CCP (mg/L)	Observaciones
<b>Boro</b>	0.5	2.0	<i>Elemento esencial. Tóxico en plantas sensibles. Muchas herbáceas tolerantes de 2 a 10 mg/L</i>
<b>Hierro</b>	5.0	10.0	<i>No tóxico en suelos aireados. Disminuye asimilabilidad de fósforo y molibdeno</i>
<b>Manganeso</b>	0.2	10.0	<i>Tóxico para muchos cultivos en suelos ácidos</i>
<b>Zinc</b>	2.0	10.0	<i>Tóxico para muchas plantas, la toxicidad se reduce a pH&lt;6 y suelos de textura fina</i>

### 3. IMPACTO DEL RIEGO. ESTUDIO DE CASOS

**3.1. Consideraciones generales sobre las propiedades particulares de algunos tipos de suelos volcánicos y su respuesta frente a algunas propiedades del agua de riego.** (para una breve introducción a estos tipos de suelos, ver Apéndice: Andosoles y suelos ácidos)

#### 3.1.1. Adsorción específica de aniones inorgánicos y orgánicos

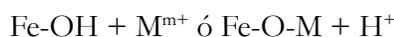
Tanto los aniones orgánicos como los aniones inorgánicos como el fluoruro y oxianiones pueden adsorberse en las superficies hidroxiladas por mecanismos de intercambio de ligando:



Esta reacción está favorecida por las elevadas energías de enlace entre algunos aniones (fosfato, borato, fluoruro, ácidos orgánicos) y el Al y Fe de los grupos funcionales superficiales de los silicatos de Al amorfos y oxi-hidróxidos de Fe y Al. La reversibilidad de esta reacción, que está relacionada con la biodisponibilidad del anión, depende del pH y la formación de enlaces bidentados. Como consecuencia de estas reacciones, los índices generales de asimilabilidad o de toxicidad de elementos o especies absorbibles por los cultivos no son aplicables en estos tipos de suelos. Por otra parte, el mayor contenido en carbono orgánico que presentan los suelos ácidos en relación con otros tipos de suelos en las mismas condiciones climáticas y de uso del suelo se ha atribuido en parte a la interacción de la materia orgánica con las superficies minerales mediante reacciones similares a la anterior.

### **3.1.2. Adsorción de cationes (Ca, microelementos metálicos)**

Los cationes pueden ser adsorbidos selectivamente mediante reacciones del tipo:



Con lo que el catión metálico queda incorporado a la superficie. Como en el caso de los aniones, la reversibilidad de esta reacción depende del pH. Como en el caso de los aniones, los índices generales de nivel óptimo de asimilabilidad y toxicidad no son aplicables a estos tipos de suelos.

### **3.1.3. Propiedades físicas**

Los elevados contenidos en silicatos de Al amorfos y de oxihidróxidos de Fe y Al presentes en los Andisoles y suelos ándicos, dan lugar generalmente una fuerte microagregación que va a determinar una elevada porosidad, baja densidad aparente y elevada estabilidad estructural. Una de las consecuencias es que en estos tipos de suelos la degradación de la estructura es relativamente insensible a la sodificación producida por el riego. Este fenómeno fue descrito por primera vez en Hawaii por El-Swaify (1975) que lo atribuyó al efecto estabilizante de los oxi-hidróxidos de Fe y Al frente a los procesos de hinchamiento y dispersión que presentan las arcillas sódicas.

## **3.2. Estudio de casos**

### **3.2.1. El Boro en suelos bajo riego de las Islas Canarias**

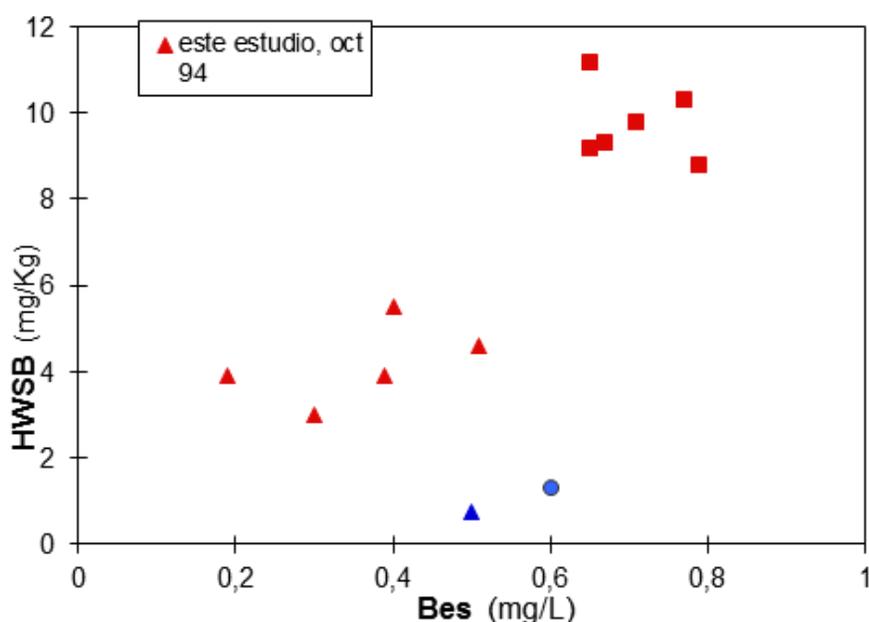
Las concentraciones de boro en las aguas de riego en las Islas Canarias se encuentran generalmente entre las concentraciones CCP y CLP, por lo que existe riesgo de acumulación de boro a corto y medio plazo. Las concentraciones de B en AD y AR con origen AD, se encuentran alrededor de 1 mg.L<sup>-1</sup> respondiendo a la exigencia de las autoridades sanitarias. Para mantener este límite hay que utilizar con frecuencia membranas que rechazan el B a elevados valores de pH, lo que encarece el proceso de desalación. Recientemente, la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2011) ha propuesto ampliar el límite a 2,4 mg.L<sup>-1</sup>. De aplicarse este nuevo umbral en las directrices españolas o europeas, empeoraría considerablemente desde el punto de vista agronómico la calidad de las AD y AR, que puedan destinarse al riego.

El boro se adsorbe específicamente en las superficies hidroxiladas, por lo que también presenta un comportamiento particular en suelos ándicos. Para facilitar la comprensión del comportamiento del boro en distintos suelos, recordemos los dos parámetros más importantes del boro y sus niveles críticos de toxicidad:

- B soluble en agua caliente (HWSB) >5 mg B kg<sup>-1</sup> de suelo (Reisenauer et al., 1973). Este parámetro representa la cantidad de B adsorbido fácilmente disponible por la planta.

- Concentración de B en la disolución del suelo (pasta saturada)  $>1$  a  $2 \text{ mg B L}^{-1}$

La capacidad amortiguadora del suelo para mantener una concentración determinada de B en la disolución puede estimarse al comparar estos dos parámetros, como se representa en el gráfico siguiente (Figura 1). Destaca la elevada capacidad amortiguadora de los suelos ándicos; por ejemplo, los valores de HWSB pueden duplicar los valores considerados tóxicos con concentraciones correspondientes de B de disolución inferiores a  $1 \text{ mg L}^{-1}$ . Como era de esperar, esta capacidad amortiguadora se refleja en los niveles de B que alcanzan los cultivos. Así, en la Tabla 2 se comparan las concentraciones de B en suelo (agua caliente) con las correspondientes en hoja en cultivo de platanera, en suelos ándicos de sorriba del Sur de Tenerife y suelos de Guía (Gran Canaria): en estos últimos se alcanzan concentraciones de B foliar próximos a niveles tóxicos con valores de HWSB alrededor de la mitad que los mostrados en los suelos ándicos.



**Figura 1.** Boro soluble en agua caliente (HWSB) y en la pasta saturada (Bes) en un suelo ándico de Tenerife (en rojo: cuadrados muestreo 1999, triángulos 1994) comparado con suelos “normales” (en azul). (Con datos de Hernández Moreno (1994-2005))

Queda pues de manifiesto que las diferentes guías para metales y metaloides no van a ser aplicables en suelos ándicos y serán necesarias evaluaciones específicas del sitio donde se va a implementar el regadío así como ensayos de laboratorio (columnas, batch) donde se estudie la adsorción y transporte de estos constituyentes, teniendo en cuenta las posibles especies.

**Tabla 2.** Comparación de la concentración de boro foliar en platanera para suelos de distinta capacidad de amortiguación de boro (datos recopilados por los autores en plataneras del Valle de San Lorenzo (Tenerife) y Guía (Gran Canaria))

Tenerife y Gran Canaria	B agua caliente	B foliar
	mg/kg de suelo	mg/kg de Materia Seca
Suelos ándicos	6-12	30-60
Suelos no ándicos	4-6	80-240

### 3.2.2. Sensibilidad a la sodificación en distintos tipos de suelos

Como se ha indicado anteriormente, la respuesta de la permeabilidad del suelo a la calidad del agua de riego depende fundamentalmente de la combinación de RAS y CE. En Canarias, la experiencia en este sentido es amplia debido a la frecuencia con la que se presentan valores desfavorables de RAS y alcalinidad, comentados anteriormente. La calidad de los nuevos recursos hídricos puede agravar la situación, ya que los niveles salinos relativamente bajos de las aguas de riego desaladas o regeneradas de origen desaladas, han provocado problemas de permeabilidad, como han descrito Palacios *et al.* (2000) en suelos arcillosos del norte de Gran Canaria. En platanera, se comprobó un descenso significativo de la permeabilidad tras regar dos años con agua depurada y posteriormente desalinizada al compararlo con las parcelas regadas con agua depurada sin desalinizar (Palacios *et al.*, 2000). En un campo de golf se ha comprobado la entrada en zona de riesgo de provocar impermeabilización cuando se procedió a la desalación del agua depurada (Estévez *et al.*, 2010). Por otra parte, los tipos de cultivo y manejo del riego pueden paliar los efectos negativos de la calidad del agua. Así, en cultivos forrajeros se ha comprobado una mejora en la estructura del suelo regado con agua regenerada al instalar un riego de alta frecuencia (Mendoza *et al.*, 2005 y Palacios *et al.*, 2008 y 2009). Estas experiencias muestran los beneficios de disponer de diferentes calidades de agua para poder combinar estrategias dirigidas a optimizar los recursos hídricos.

Los efectos del riego en la sodificación/alcalinización en suelos ándicos de las Islas Canarias han sido poco estudiados, probablemente debido a que generalmente no se aplican los métodos adecuados de caracterización de los suelos (ándicos y ricos en óxidos de Fe y Al). Los resultados que en este sentido se han obtenido en las experiencias de riego BALTEN (Balsas de Tenerife) en el sur de Tenerife y en fincas del ICIA con suelos de sorriba, confirman la estabilidad estructural de los suelos ándicos frente a la sodificación (Hernández Moreno, 1994-2005; Armas Espinel *et al.*, 2003, Armas Espinel, 2012). La estabilidad estructural fue estimada mediante las siguientes propiedades: conductividad hidráulica, dispersión de arcillas, hinchamiento-retracción y movilidad electroforética. Armas Espinel *et al.*, 2003, sugieren unos contenidos mínimos de alófana y de óxidos de Fe y Al para impedir el efecto dispersante del sodio.

## REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- ANZECC y ARMCANZ, (2000). Australian guidelines for water quality monitoring and reporting. National Water Quality Management Strategy Paper No 7, Australian and New Zealand. Environment and Conservation Council & Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand, Canberra.
- Armas-Espinel, S.; Hernández-Moreno, J.M.; Muñoz-Carpena, R. y Regalado, C. (2003). Physical properties of “sorriba”-cultivated volcanic soils from Tenerife in relation to andic diagnostic parameters. *Geoderma* 117:297–311.
- Armas Espinel, S. (2012). Contribución al estudio de las propiedades físicas de suelos ándicos de las islas canarias. Disertación de tesis de doctorado, Dept.de Edafología y Geología, Univ. de La Laguna.
- Ayers, R.S. y Westcott, D.W. (1976). Water quality for agriculture. Irrigation and drainage paper 29, Food and Agriculture organization of the United Nations, Rome
- Ayers R.S. y Westcot D.W., (1985). Water quality for agriculture. Irrigation and Drainage Paper 29, 1st revision, Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome.
- Custodio, E. (1978). Geohidrología de terrenos e islas volcánicas. Centro de Estudios Hidrográficos–CEDEX, Publ. 128. Madrid: 1–303.
- Custodio, E. y Cabrera, M.C. (2002): ¿Cómo convivir con la escasez de agua? El caso de las Islas Canarias. *Boletín Geológico y Minero*, 113 (3): 243-258.
- El-Swaify, S.A. (1975). Changes in the physical properties of soil clays due to precipitated aluminium and iron hydroxides: I. Swelling and aggregate stability after drying. *Soil Science Society of America Proceedings*, 39: 1056-1063
- Estévez, E.; Cabrera, M.C.; Fernández, J.R.; Hernández-Moreno, J.M.; Mendoza Grimón, V. y Palacios, M.P.(2010). 25 Años regando un campo de golf con aguas depuradas en Gran Canaria. *Spanish Journal of Agricultural Research*. Vol 8(S2):95-101
- Hernández Moreno, J.M. 1994- 2005. Proyecto de colaboración del Departamento de Edafología y Geología de la Universidad de La Laguna con “Balsas de Tenerife” (BALTEN) para el estudio de “La evolución de los suelos y plantas bajo riego con aguas depuradas de Santa Cruz de Tenerife en el Valle de San Lorenzo”. Informes, Números 1 al 14.
- Jensen, K.; Matsuno, Y.; van der Hoek, W. y Cairncross, S. (2001). Limitations of irrigation water quality guidelines from a multiple use perspective. *Irrigation and Drainage Systems* 15: 117–128, 2001.
- Mendoza-Grimón, V. (2005). Reutilización de aguas depuradas para el riego localizado de especies forrajeras: el ciclo del fósforo en el medio ambiente rural. Disertación de tesis de doctorado. Dept. de Patología y Producción Animal, Univ de Las Palmas de GC.
- Palacios, M.P.; Haman, D.; Del-Nero, E.; Pardo, A.; Pavón, N. (2000). Banana production irrigated with treated effluent in Canary Islands. *Transaction of the ASAE*. Vol 43(2): 309-314
- Palacios M.P.; Mendoza-Grimón V.; Fernández, F.; Fernandez-Vera, J.R y Hernandez-Moreno, J.M. . (2008). Sustainable Reclaimed Water Management by Subsurface Drip Irrigation System: a study case for forage production. *Water Practice & Technology*, vol 3 issue 2
- Palacios-Díaz, M.P., Mendoza V., Fernández-Vera, J.R.; Tejedor-Junco, M.T. y Hernández-Moreno, J.M.. (2009). Subsurface drip irrigation and reclaimed water quality effects on phosphorus and salinity distribution and forage production. *Agricultural Water Management* 96: 1659-1666.
- Plan Hidrológico Insular Tenerife. (1989). Calificación hidroquímica de las aguas de Tenerife. Tomo II. Gobierno de Canarias y Cabildo Insular de Tenerife.

- Reisenauer, H.M. y Walsh, L.M. (1973). Testing soils for sulphur, boron, molybdenum, and chlorine. In: L.M. Walsh, J.D. Beaton, eds. *Soil Testing and Plant Analysis*. Madison, WI: Soil Science Society of America, (1973), pp. 173–200.
- USEPA (2004). “Guidelines for wastewater reuse”. U.S. Environmental Protection Agency. EPA/625/R-04/108. Washington, DC.
- Westcot, D.W. (1997). Quality control of wastewater for irrigated crop production. Water reports-10. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- WHO (2011). World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality - 4th ed. ISBN 978 92 4 154815 1
- Yermiyahu, U.; Tal, A.; Ben-Gal, A.; Bar-Tal, A.; Tarchitzky, J. y Lahav, O.(2007). Rethinking Desalinated Water Quality and Agriculture. *Science* 318: 920-921.

#### **APENDICE: Andosoles y suelos ándicos**

Los suelos de origen volcánico presentan frecuentemente unas características químicas físicas muy particulares de gran incidencia en su capacidad de retención de compuestos orgánicos e inorgánicos así como en su comportamiento hidrológico (retención de humedad, transporte, etc.). Estas propiedades se deben a la presencia de materiales amorfos (alofana, imogolita, oxi-hidróxidos de Al y Fe (ferrihidrita), en general fuertemente asociados a la materia orgánica. Los suelos con estos constituyentes se denominan suelos ándicos y Andosoles cuando los constituyentes son predominantes en la fracción coloidal. Estos suelos son frecuentes en las Canarias occidentales, especialmente zonas altas y medias de las Islas donde debe destacarse también la presencia frecuente, especialmente en suelos derivados de materiales basálticos, de Haloisita (mineral de arcilla 1:1) y oxi-hidróxidos cristalinos de hierro y aluminio. Estos últimos también inducen una alta agregación y estabilidad estructural. Todo ello explica por qué generalmente no sean aplicables las funciones clásicas de edafotransferencia a algunos tipos de suelos de las Islas, por ejemplo, la relación entre textura y conductividad hidráulica saturada. Así, suelos arcillosos se comportan en el terreno como suelos de textura más ligera en lo que respecta al transporte de agua. La fuerte agregación explica por qué los métodos convencionales de dispersión para el análisis granulométrico no sean válidos en estos tipos de suelos.

## NIVELES DE CONCENTRACIONES DE NITRATOS EN AGUAS DE CONSUMO HUMANO DE LA ISLA DE GRAN CANARIA

Rodríguez Rodríguez, Inmaculada. Área de Toxicología. Universidad de La Laguna.  
*inrdrd@yahoo.es*

Caballero Mesa, Jose M. Consejería de Sanidad. Gobierno de Canarias.  
*jcabmes@gobiernodecanarias.org*

Gutiérrez Fernández, Ángel. Facultad de Farmacia. Universidad de La Laguna.  
*ajguti@ull.es*

Rubio Armendáriz, Carmen. Facultad de Farmacia. Universidad de La Laguna.  
*crubiocof@gmail.com*

Hardisson De la Torre, Arturo. Facultad de Farmacia, Universidad de La Laguna.  
*atorretox@gmail.com*

**RESUMEN:** Los iones nitrato y nitrito son óxidos naturales del nitrógeno que forman parte del ciclo del nitrógeno. El nitrato se utiliza principalmente en fertilizantes o como conservante alimentario, especialmente en carnes curadas. La concentración de nitrato en aguas subterráneas y superficiales es normalmente baja, pero puede incrementarse por el lixiviado de las tierras de cultivo o de la oxidación del amonio proveniente de residuos humanos o animales, así como de aguas residuales urbanas o aguas residuales procedentes de explotaciones ganaderas. Su toxicidad está relacionada con la producción de nitrosaminas y su participación en la formación de metahemoglobinemia. El método empleado para la determinación fue mediante espectrometría ultravioleta selectivo que permite la detección rápida de nitrato realizando la medida de absorción UV a 220 nm. De las 210 muestras, correspondientes a los 21 municipios de la isla de Gran Canaria, sólo dos, pertenecientes al municipio de Las Palmas de Gran Canaria, superan muy poco los 50 mg/L fijados en la legislación vigente.

### 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La atmósfera es el reservorio principal de nitrógeno, representando el 78% de los gases atmosféricos (Curtis, 1987). La presencia natural de los nitratos en el medio ambiente es consecuencia del ciclo del nitrógeno (Brito y *col*, 1991). Los nitratos son muy estables debido a su estructura plana, pero pueden ser reducidos por acción microbológica. La utilización principal de los nitratos es la obtención de compuestos nitrogenados utilizados en la elaboración de fertilizantes. La importancia del nitrato viene dada porque puede ser precursor del nitrito, debido a procesos de reducción. Esta reducción puede ser debida a la acción del

calor o de algún agente reductor (Discher, 1966). Con este trabajo, se pretende observar qué cantidad de nitratos se encuentra en las aguas que consume la población de Gran Canaria.

Con las concentraciones analizadas, se determina su calidad y se observa si cumple el Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad de agua de consumo humano. A la vez que se intenta conocer, si es posible, los factores que influyen en las diferencias de concentración entre los distintos municipios de la isla, así como las que producen dentro de los mismos.

Una vez analizados estos parámetros se valora el riesgo al que está sometida la población y se determinará, qué porcentaje de la Ingesta Diaria Admisible (IDA) es el proveniente sólo del agua de bebida que se consume. Este porcentaje varía según la población que se trate, ya que en los lactantes, el nitrato cobra aún mayor importancia toxicológica ya que poseen mayor tendencia a presentar metahemoglobinemia.

## 2. REVISIÓN Y ANTECEDENTES

Comly en 1945 (Organización Panamericana de la Salud, 1980) observó por primera vez la toxicidad para el hombre de los nitratos en el agua. En 1895, Mayo describió el primer caso de intoxicación por nitritos en el ganado vacuno (Organización Panamericana de la Salud, 1980). Desde entonces hasta la actualidad, los nitratos, nitritos y nitrosaminas, están tomando cada vez más relevancia toxicológica, por los efectos que originan en los organismos (Fristsch y *col*, 1990).

La ingesta del ión nitrato se debe fundamentalmente, al consumo de carnes, productos cárnicos, vegetales y agua. La forma más rápida y clara de consumo de nitratos por la población es el agua de bebida, tanto envasada como de la red pública; sin embargo la mayor fuente de ingestión de este ión son los productos de la huerta, tanto verduras y hortalizas como frutas. Las verduras tienen mayor importancia por su capacidad de acumulación. La capacidad de acumulación de este ión, no solamente depende de la especie vegetal y variedad de que se trate, sino además, de otros factores ambientales como el entorno ecológico, temperatura o la fertilización utilizada (Fristsch y de Saint Blanquat, 1990; Consalter y *col*; 1992; Domínguez 1994a; Escoín y *col*, 1998).

En los productos cárnicos la presencia de nitrato y nitrito se debe a que está permitida la adicción de éstos como aditivos alimentarios. Su función es evitar el crecimiento del *Clostridium botulinum*, bacteria anaerobia que produce la toxina botulínica en los alimentos. Las sales nítricas empleadas en salazones o curados, además de dar garantías sanitarias, le confiere a los alimentos unas propiedades organolépticas excelentes, evitando que las carnes tomen colores marrones y al producir y favorecer ese característico sabor y olor de los alimentos curados.

Los principales efectos tóxicos del nitrito son:

- 1) Puede producir metahemoglobinemia al unirse el nitrito a la molécula de hemoglobina, dificultando el transporte de oxígeno y produciendo una anoxia en los tejidos del afectado.
- 2) Se puede unir a aminas y formar nitrosaminas, sustancias potencialmente cancerígenas. Esta reacción ha sido muy estudiada en el laboratorio, pero existen gran cantidad de dudas cuando estos modelos se estudian “in vivo”. Su importancia viene determinada por su relación con distintos tipos de cáncer, si bien, es necesario mayor cantidad de estudios que aclaren los mecanismos por los que ejercen su efecto.

La contaminación del agua de bebida con nitratos se produce debido al ascenso del agua de mar hasta los acuíferos de agua dulce y al lavado que las precipitaciones y el riego originan sobre los suelos excesivamente fertilizados con abonos nitrogenados. De hecho, el Real Decreto 261/1996 de 16 de febrero, sobre protección de las aguas contra la contaminación producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias, indica que entre las fuentes difusas que contribuyen a la contaminación de las aguas, la más importante actualmente, es la excesiva o inadecuada aplicación de fertilizantes nitrogenados utilizados en la agricultura. En esta norma, también se establecen zonas vulnerables de contaminación, así como los programas de actuación a seguir por parte de las distintas Comunidades Autónomas con objeto de prevenir y reducir la contaminación por abonos nitrogenados en las aguas superficiales y subterráneas.

El Real Decreto 140/2003, por el que se establecen los criterios sanitarios del agua de consumo humano tiene por objeto establecer los criterios sanitarios que deben cumplir las aguas de consumo humano y las instalaciones que permiten su suministro desde la captación hasta el grifo del consumidor y el control de éstas garantizando su salubridad, calidad y limpieza, con el fin de proteger la salud de las personas de los efectos adversos derivados de cualquier tipo de contaminación de las aguas. El contenido de nitratos debe ser  $< 50$  mg/L y el contenido de nitritos  $< 0.50$  mg/L. Se ha de cumplir la condición de que  $\{\text{nitrato}\} / 50 + \{\text{nitrito}\} / 3 < 1$ , donde los corchetes significan concentraciones en mg/L para nitratos y nitritos.

Desde la entrada en vigor del anterior Real Decreto citado se ha elaborado, entre otros, un Protocolo sanitario por incumplimiento del valor paramétrico de nitrato y nitrito, aplicable desde el 15 de diciembre de 2006.

El Decreto 49/2000, de 10 de abril, de la Consejería de Obras Públicas, Vivienda y Aguas por el que se determinan las masas de agua afectadas por la contaminación por nitratos de origen agrario y se designan las zona vulnerables por dicha contaminación, en su artículo 1 define como masas de agua afectadas (más de 50 mg/L), en el caso de Gran Canaria, la de los acuíferos costeros de Gáldar, Guía, Moya, Telde y el barranco de La Aldea.

También debemos referirnos como fuente de nitratos a las excretas de animales, al contener unas cantidades de nitrógeno apreciables.

El riesgo de contaminación aumenta cuando la explotación ganadera tiene un régimen intensivo. En este tipo de instalaciones las deyecciones se acumulan en una superficie pequeña. Sin embargo, no podemos despreciar el hecho de que el ganado está en el campo, ya que aunque existe menor acumulación, las cantidades arrastradas a los niveles freáticos no dejan de ser significativas. Con el fin de no restarle importancia a este hecho, debemos mencionar, que un novillo de 450 Kg de peso excreta alrededor de 43 g de nitrógeno por año (OPS, 1980). Con este dato, podemos considerar la contaminación que se puede producir en una zona sometida a esta actividad ganadera.

En zonas urbanas afectadas por contaminación fotoquímica se pueden formar cantidades sustanciales de nitratos en partículas. La Directiva 1999/30/CE del 22 de abril de 1999 relativa a los valores límite de dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y óxidos de nitrógeno, partículas y plomo en el aire ambiente, regula la contaminación de los óxidos de nitrógeno.

Las empresas que más contaminan son las refinerías y las industrias alimentarias. Las industrias del petróleo producen importantes emisiones de compuestos nitrogenados a la atmósfera. En cuanto a las industrias alimentarias, las aguas residuales que producen pueden contener abundantes cantidades de nitrógeno.

### **3. MEDIDAS PREVENTIVAS**

Las medidas preventivas deben estar encaminadas a disminuir la ingesta de nitratos y nitritos consumiendo alimentos y aguas pobres en estos iones.

En cuanto a los alimentos elaborados es necesario un estricto control de las cantidades de aditivos utilizados, ya que en ocasiones se añaden en exceso. En este sentido es fundamental la educación sanitaria dirigida a operarios y encargados de fábricas con el fin de mejorar y controlar este procedimiento. En los alimentos infantiles se ha de controlar con mayor rigor pues es el grupo de población que mayor susceptibilidad presenta frente a este ión.

En cuanto a alimentos de origen vegetal, su acumulación se debe a procesos biológicos y cobra bastante importancia el adoptar y favorecer formas de cultivos agrícolas y medio tecnológicos que no impliquen la acumulación de los mismos en el medio ambiente debido a la utilización excesiva de los fertilizantes.

Para evitar la contaminación de las aguas, sería conveniente tomar como solución a estos problemas la protección de los acuíferos evitando la contaminación por las actividades agrícolas, fomentar el abonado puntual y riego por goteo y evitar los abonados difusos y riegos "a manta".

Las medidas preventivas para evitar el descenso de nitratos hacia las aguas subterráneas provenientes del exceso de fertilización los podríamos resumir en los siguientes:

- Realizar sondeos para determinar grados de contaminación de las aguas subterráneas.
- Establecer zonas de protección por su especial susceptibilidad a la contaminación.
- Adecuada elección del cultivo.
- Adecuación del uso de fertilizantes.
- Delimitar áreas permanentes sin fertilizar, con el objeto de paliar el excesivo grado de contaminación.

Del mismo modo, debemos de tener precaución con los acúmulos puntuales de estiércoles u otras materias orgánicas que puedan producir lixiviación de nitratos a las capas. En este caso es necesario recurrir a zonas de almacenamiento dotadas con sistemas de impermeabilización y recogida de lixiviados.

#### **4. MATERIAL Y MÉTODOS.**

Para el análisis de las muestras se emplea el método espectrométrico ultravioleta selectivo, descrito en los Métodos Normalizados de APHA-AWWA-WPCF (1992). En este procedimiento, la medida de absorción UV a 220 nm hace posible la determinación rápida de nitrato.

Este método sólo es útil para muestras con bajo contenido en materia orgánica, es decir, aguas naturales no contaminadas y suministros de agua potable.

Hay que tener en cuenta que la materia orgánica disuelta puede también absorber a 220 nm. El nitrato no absorbe a 275 nm, por ello, podemos utilizar esta segunda medida para corregir el valor del nitrato. Esta corrección depende de la composición y naturaleza de la materia orgánica y puede variar de unas aguas a otras.

Se utiliza como instrumental un espectrofotómetro Shimadzu UV-265, equipado con cubetas de sílice de un centímetro de paso de luz, un baño de ultrasonidos Penta® y material de uso frecuente en laboratorio.

Se han analizado un total de 210 muestras, correspondientes a los 21 municipios de la isla de Gran Canaria. La mayoría de ellas fueron obtenidas de fuentes de locales públicos (bares, restaurantes, gasolineras, etc.). En algunos casos se recurrió a la toma de muestras en domicilios privados conectados a la red de abastecimiento público. Todas las muestras fueron recogidas en recipientes de polietileno y conservadas entre 0° y 4°. Se analizaron al día siguiente de su recogida.

El número de muestras recogidas en cada municipio, atiende principalmente a dos criterios:

- A mayor número de habitantes mayor número de toma de muestras.
- Se tomaron tantas muestras como núcleos urbanos separados geográficamente existen dentro de cada municipio.

Todas las muestras se analizaron en el mismo momento de abrir el envase, determinándose los niveles de nitratos. Para la realización de la curva patrón, se partió de una disolución intermedia de nitrato, tomando distintas cantidades de ésta y llevándolas a un volumen de 50 ml. De esta manera preparamos los estándares de calibrado de nitratos con un intervalo de 0.87 a 14-18 mg/L. Como blanco hemos usado agua destilada. A continuación, las muestras se someten a las medidas de absorción, tanto a 220, como a 275 nm de una manera directa; sin tratamiento previo.

Una vez obtenido el valor de la absorbancia a 220 nm, este debe ser rectificado según la absorbancia a 275 nm (interferencia debida a materia orgánica disuelta). Para ello restamos, dos veces el valor de la absorbancia leída a 275 nm de la lectura a 220 nm, obteniendo la absorbancia debida al nitrato.

Todos los datos de ingesta diaria, se han obtenido suponiendo una ingesta media en Canarias de 2 litros de agua al día. Posteriormente se ha obtenido el porcentaje de la IDA que se ha calculado para personas adultas de 65, 70 y 75 kg de peso y teniendo en cuenta la IDA recomendada por la FAO/OMS para nitratos que corresponde a 3,7 mg/kg/día.

## **5. RESULTADOS Y DISCUSION.**

De los resultados obtenidos sólo en el municipio de Las Palmas de Gran Canaria existen algunas muestras que superan muy poco los 50 mg/L fijados por la legislación vigente.

En el municipio de Las Palmas de Gran Canaria es donde se encuentra los valores más altos de concentración de nitratos: 51,51 y 51,39 mg/L. Para una persona de 65 kg le correspondería unos valores de 42,84 y 42,74% respectivamente. De las muestras recogidas, éstas dos son las únicas que superan los valores fijados por la legislación.

Si no tenemos en cuenta los resultados del municipio de Las Palmas, el municipio de Valleseco es el que muestra unos valores entre 44,43 y 41,77 mg/L. A estos valores le corresponderían unos valores de IDA, para 65 kg, entre 36,95 y 34,74% .

Aunque se han encontrado dos valores altos, que superan la concentración fijada en la legislación, el resto de los valores se encuentran por debajo del límite máximo, por lo que podemos afirmar que las aguas de consumo humano son seguras, en cuanto a la ingesta de nitratos se refiere.

Los valores altos de concentración de nitratos en el municipio de Las Palmas de Gran Canaria podrían deberse a la explotación excesiva de los acuíferos que facilita el que las aguas salinas invadan las zonas de agua dulce.

La sobreexplotación de un acuífero se produce cuando la extracción de agua del subsuelo se realiza a un ritmo superior al de la infiltración o recarga natural. Esta situación implica el consumo progresivo del agua que se encontraba almacenada en el terreno, y acarrea numerosas consecuencias negativas, como por ejemplo: un gradual encarecimiento de la producción, problemas en los cursos de agua o entre usuarios y, frecuentemente, una degradación de la calidad del agua. Si la situación de sobreexplotación se mantiene, es posible que los acuíferos terminen incluso agotándose.

En los acuíferos situados junto a la costa el problema se agrava, ya que la extracción artificial de agua favorece la entrada “intrusión” de agua marina. Este hecho provoca una salinización del acuífero con el consiguiente deterioro de la calidad de sus aguas hasta hacerlas inadecuadas para la agricultura o el consumo humano .

En las siguientes tablas se reflejan los contenidos medios de las concentraciones de nitratos, de la ingesta diaria y de los porcentajes de la IDA. Para poder comentar y apreciar de una manera más detallada cada una de las tablas, se ha dividido la Isla en cuatro zonas: zona norte, zona centro, zona sur y zonas vulnerables.

**TABLA 1:** Contenidos medios de las concentraciones de nitratos, de la ingesta diaria y de los porcentajes de la IDA de los municipios de la zona norte.

Municipios de la zona norte	Concentración (mg/L)	Ingesta Diaria (mg)	Porcentaje de la IDA que aporta el agua para personas de:		
			65 kg	70kg	75kg
<b>Agate</b>	3,35	6,7	2,78	2,58	2,41
<b>Aucas</b>	2,83	5,67	2,36	2,19	2,04
<b>Firgas</b>	13,14	26,29	18,93	10,14	9,47
<b>Las Palmas de Gran Canaria</b>	3,94	7,89	3,28	3,04	2,84
<b>Santa Brígida</b>	11,87	23,74	9,87	9,16	8,55
<b>Teror</b>	28,2	56,41	23,45	21,77	20,32

La concentración media más alta de nitrato corresponde al municipio de Teror con un valor de 28,2 mg/mL, seguido del municipio de Firgas con un valor de 13,14 mg/L (Tabla 1).

Las concentraciones medias más altas descritas anteriormente, dan lugar a unos porcentajes de la IDA de 23,45%, en el municipio de Teror, y de 18,93 %, para el municipio de Firgas. Ambos porcentajes se encuentran referidos a una persona de 65 Kg de peso.

**TABLA 2;** Contenidos medios de las concentraciones de nitratos, de la ingesta diaria y de los porcentajes de la IDA de los municipios de la zona centro.

Municipios de la zona centro	Concentración (mg/L)	Ingesta Diaria (mg)	Porcentaje de la IDA que aporta el agua para personas de:		
			65 kg	70kg	75kg
Artenara	2,99	5,98	2,48	2,3	2,15
Tejeda	3,41	6,83	2,83	2,63	2,46
Valsequillo	6,26	12,52	5,2	4,83	4,51
Vega de San Mateo	5,44	10,88	4,52	4,2	3,92

Respecto a los municipios de la zona centro, todos tienen valores medios muy bajos siendo el más alto el que corresponde a Valsequillo con 6,26 mg/L (Tabla 2).

Los valores medios obtenidos de la zona centro de la isla de Gran Canaria están en el intervalo de 2,99 y 6,26 mg/L, existiendo bastante poca variabilidad de concentraciones, lo que se refleja en una ingesta diaria máxima de 12,52 mg, y que corresponde a una persona de 65 kg.

**TABLA 3;** Contenidos medios de las concentraciones de nitratos, de la ingesta diaria y de los porcentajes de la IDA de los municipios de la zona sur.

Municipios de la zona sur	Concentración (mg/L)	Ingesta Diaria (mg)	Porcentaje de la IDA que aporta el agua para personas de:		
			65 kg	70kg	75kg
Agüimes	0,97	1,94	0,8	0,74	0,7
Ingenio	1,04	2,09	0,86	0,8	0,75
San Bartolomé de Tirajana	8,94	17,89	7,44	6,91	6,45
Santa Lucía de Tirajana	6,22	12,45	5,17	4,8	4,49
Mogán	1,18	2,35	0,98	0,91	0,85

Los municipios de la zona sur también poseen valores medios muy bajos de nitratos, siendo el valor más alto medio el correspondiente a San Bartolomé de Tirajana, 8,94 mg/L. En el municipio de Agüimes aparecen las concentraciones más bajas de toda la zona sur con un valor de 0,97 mg/L (Tabla 3)

**TABLA 4;** Contenidos medios de las concentraciones de nitratos, de la ingesta diaria y de los porcentajes de la IDA de los municipios considerados zonas vulnerables.

Municipios considerados zonas vulnerables	Concentración (mg/L)	Ingesta Diaria (mg)	Porcentaje de la IDA que aporta el agua para personas de:		
			65 kg	70kg	75kg
Gáldar	4,24	8,48	3,52	3,27	3,05
Moya	2,45	4,9	2,04	1,89	1,76
Santa María de Guía	0,53	1,06	0,44	0,41	0,38
San Nicolás de Tolentino (La Aldea)	6,63	13,27	5,51	5,12	4,78
Telde	21,31	42,62	17,72	16,45	15,35

Respecto a las concentraciones medias en las zonas consideradas vulnerables, ningún dato supera la concentración máxima establecida por la legislación vigente. El valor medio más alto corresponde al municipio de Telde, 21,31 mg/L, que se corresponde con una media de IDA de 42,62 mg. El porcentaje de la IDA que aporta el agua en una persona de 65 kg, para el municipio de Telde, es de 17,72 % (Tabla 4).

El valor de concentración media más bajo corresponde al municipio de Santa María de Guía siendo de 0,53 mg/L.

Todos los municipios de la isla de Gran Canaria, excepto dos puntos de muestreo del municipio de Las Palmas de Gran Canaria cumplen con la legislación vigente respecto a la concentración de nitratos.

En general, las aguas de consumo humano de la isla de Gran Canaria son sanitariamente óptimas para su consumo en cuanto a nitratos se refiere, si bien debe vigilarse las concentraciones de ciertos municipios.

#### REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION (APHA, AWWA, WPCF). (1992). Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Díaz de Santos. Madrid. 4-2, 4-3, 4-145, 4-161.
- Decreto 49/2000, de 10 de abril, por el que se determinan las masas de agua afectadas por la contaminación de nitratos de origen agrario y se designan las zonas más vulnerables por dicha contaminación. BOC (miércoles 19 de abril de 2000), 48, 4705-4792.
- Orden de 27 de octubre de 2000, por el que se establece el Programa de Actuación a que se refiere el artículo 6 del Real Decreto 261/1996, de 16 de febrero, con el objeto de prevenir y reducir la contaminación causada por los nitratos de origen agrario. BOC (lunes, 13 de noviembre de 2000), 149, 17273-17384.

- Real Decreto 1744/2003, de 19 de diciembre, por el que se modifica el Real Decreto 1074/2002, de 18 de octubre, por el que se regula el proceso de elaboración, circulación y comercio de aguas de bebida envasadas. BOE (martes 30 de diciembre de 2003), 312, 46524-46529.
- Brito Miralles G, Hardisson de la Torre a, Herrera Benítez CD (1991). Toxicología de los nitratos y nitritos. Niveles de concentración en productos cárnicos. En: Miscelánea Enric Casassas. Universitat Autònoma de Barcelona. 69-72.
- Consalter A, Rigato A, Clamor L, Giandon P (1992). Determination of nitrate in vegetables using an ion-selective electrode. *J Food Comp Anal.* 5: 252-256.
- Curtis H (1987). *Biología*, Editorial Médica Panamericana. 4ª Ed. Buenos Aires. 1079-1081.
- Directiva 98/83/CE del Consejo de 3 de noviembre de 1988 relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano. Diario Oficial de las Comunidades Europeas, L 330/32-54.
- Discher CA (1996). *Química inorgánica farmacéutica*. Alambre. 1ª Ed. Madrid. 563-564.
- Domínguez Gento P (1994a). Contenido de nitratos en vegetales cultivados de la provincia de Valencia. *Alimentaria*, enero-febrero, 249, 49-51.
- Escoín Peña MC, Cortés Ibáñez MA, Arranz Santamarta A, RUBIO LÁZARO C (1998). Contenido de nitratos en lechugas y espinacas frescas. *Alimentaria*, diciembre, 37-41.
- Fritsch P, De Saint Blanquat G (1990). Nitratos, nitritos y nitrosaminas. En: Derache J. *Toxicología y seguridad de los alimentos*. Omega. Barcelona. 233-247.
- ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD (1980). *Criterios de salud ambiental*. Nitratos, nitritos y compuestos N-nitrosos. Washington DC

## LOS HUMEDALES ARTIFICIALES COMO ALTERNATIVA ANTE LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES A PEQUEÑA ESCALA. EL CASO DE SANTA LUCÍA - GRAN CANARIA

Vera, Luisa. Dirección actual: Dpto. de Ingeniería Química y TF. Campus de Anchieta, Facultad de Química. Avda. Astrof. Fco. Sánchez, s/n, 38200. Universidad de La Laguna.

*luvera@ull.es*

Martel, Gilberto y Márquez, Miguel. Departamento de Agua, Instituto Tecnológico de Canarias (ITC). Playa de Pozo Izquierdo, s/n, 35119 Santa Lucía. Gran Canaria. SPAIN.

*gmartel@itccanarias.org ; agua@itccanarias.org.*

**RESUMEN:** El principal objetivo de este trabajo es presentar la evolución experimentada por el Sistema de Depuración Natural (SDN) de Santa Lucía, situado en el interior de la Isla de Gran Canaria, desde su implantación. Este sistema ha permitido obtener numerosa información sobre el comportamiento real de soluciones de bajo coste en áreas subtropicales con escasez de recursos hídricos, a fin de ampliar su implementación en áreas costeras. A lo largo de estos años ha quedado de manifiesto las ventajas que implica depurar allí donde se generan las aguas residuales, sin consumo eléctrico asociado, sin pérdidas en las redes de transporte de aguas residuales, a la vez que se valorización los subproductos generados (fibra vegetal en artesanía local o cama para ganado, agua regenerada para reutilización). Todo ello ha sido posible a pesar de que el SDN ha operado en condiciones forzadas (sobrecargas hidráulicas del 200%) teniendo el clima, posiblemente, un papel primordial. Las eficacias de eliminación medias obtenidas por el sistema han superado las previsiones, alcanzando más del 80% en DBO5, 75% para la DQO y 90% para SST. La eliminación media de nitrógeno y fósforo fue del 50 y 30% respectivamente, mientras la reducción de indicadores fecales alcanzo 2 log. El SDN de Santa Lucía es un caso de estudio que permitirá transferir esta alternativa de tratamiento a otras comunidades litorales y rurales con carencias de saneamiento y depuración.

### 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las pequeñas poblaciones de menos de 2.000 habitantes equivalentes son las que presentan más deficiencias en cuanto al tratamiento de sus aguas residuales. Estas comunidades por su propia localización geográfica y grado de desarrollo, presentan una problemática específica que dificulta la provisión de los servicios de saneamiento y depuración con las mismas soluciones aplicadas en poblaciones de medio y gran tamaño (Salas et al., 2008 y Aragón et al., 2011). Muchas de estas poblaciones se encuentran en áreas alejadas de las redes de saneamiento centralizadas y, en algunos casos, están ubicadas en zonas montañosas o en el entorno de espacios naturales protegidos con altos requerimientos de protección ambiental. Por otra parte, los efluentes de aguas residuales procedentes de las pequeñas aglomeraciones urbanas tienen mayores oscilaciones de caudal y suelen estar más concentrados que los pro-

cedentes de grandes núcleos de población (Salas et al., 2008). Generalmente, en los pequeños municipios los recursos económicos suelen ser escasos y no hay personal técnico cualificado para el mantenimiento y explotación de sistemas de tratamiento complejos o altamente tecnificados. Esta escasez de recursos económicos obliga a minimizar las tareas de mantenimiento, el consumo de energía y la generación de residuos para su posterior transporte. A su vez, en determinadas regiones con escasez de recursos hídricos, el tratamiento descentralizado de las aguas residuales y su posterior reutilización se ve como una oportunidad para potenciar el desarrollo económico local. En consecuencia es necesario desarrollar sistemas que permitan la valorización local de los recursos naturales como el agua, los nutrientes y la biomasa que, lejos de ser un coste para la comunidad local, pueden generar beneficios capaces de amortizar, a medio o largo plazo, las inversiones iniciales.

En estas especiales condiciones, es necesario introducir opciones tecnológicas que cumplan una serie de exigentes requisitos, como:

- Buena adaptación medioambiental incluyendo la integración paisajística, la minimización de los ruidos y olores, la protección de la biodiversidad y la reducción o fijación de gases de efecto invernadero.
- Capacidad para lograr efluentes con calidad sanitaria y agronómica adecuada que posibilite la reutilización de las aguas depuradas en los usos permitidos por la ley.
- Capacidad de adaptación ante variaciones de caudal y carga contaminante.
- Mínima o nula demanda energética.
- Mantenimiento y explotación simples con reducido coste económico.
- Mínima extracción y transporte de lodos de depuradora.
- Valorización o aprovechamiento local de la biomasa producida.
- Integración socioeconómica del sistema para que sea gestionado de forma segura y continua por los propios beneficiarios locales.

En regiones sensibles como las Islas Canarias los datos indican que, en Gran Canaria y Tenerife, las más pobladas del archipiélago, se detectan carencias de saneamiento básico sobre todo en las áreas rurales del interior. Se estima que un 48% de las viviendas de Tenerife no tienen un saneamiento adecuado, mientras que en Gran Canaria ese porcentaje no llega al 8%. En estos casos, la población afectada supera los 400.000 habitantes, en gran parte dispersos en pequeñas aglomeraciones urbanas o con viviendas dispersas (Ramón, 2008). En estas áreas las soluciones individuales han optado por la generalización de pozos filtrantes, con o sin fosas sépticas, que representan una amenaza para la integridad de las aguas subterráneas subyacentes (Díaz, 2005). La extensión de la red de saneamiento para centralizar todos los

vertidos en depuradoras de media y gran escala supone un coste económico importante debido a las dificultades orográficas y a la dispersión de la población. Cuando se han acometido proyectos de este tipo en zonas rurales, el impacto ambiental ha sido importante en la fase de ejecución y, a la larga, estas infraestructuras suelen presentar roturas y pérdidas a lo largo de su recorrido.

Ante la necesidad de testear tecnologías adaptadas a escala real que cumplieran con las condiciones indicadas anteriormente, se desarrolló el proyecto DEPURANAT- cofinanciado por el programa europeo Interreg IIIB Espacio Atlántico-, entre 2004-2008. Al amparo de dicho proyecto, se construyeron o adaptaron varios Sistemas de Depuración Natural (SDN o WWNRS) en espacios protegidos o rurales de España y Portugal (Vera et al, 2009). En el caso de Canarias, estos proyectos fueron especialmente significativos, pues algunos fueron pioneros en el uso de tecnologías de depuración de bajo coste energético en comunidades de pequeño y mediano tamaño (Vera et al, 2008). El mayor de estos sistemas fue el de Santa Lucía, ubicado en plena Caldera de Tirajana, al sureste de Gran Canaria. En dicha zona se dan varias circunstancias comunes a otros espacios rurales de las islas, extremadamente frágiles y dependientes de los escasos recursos hídricos naturales disponibles: complicada orografía, gran dispersión poblacional, clima árido con temperaturas suaves en inviernos y lluvias esporádicas y generalmente, de carácter torrencial. Sin embargo, esta área tiene la particularidad de preservar el mejor reducto de la palmera canaria (*Phoenix canariensis*) de toda la isla, a la vez que cultivos singulares de olivos, frutales y hortalizas.

El sistema de depuración entró en servicio en Julio de 2008 y desde entonces ha sido monitorizado regularmente por el Instituto Tecnológico de Canarias (ITC) con la colaboración de la Mancomunidad Intermunicipal del Sureste de Gran Canaria y el apoyo de Acciona Agua. Los costes del programa de seguimiento llevado a cabo han sido incorporados al proyecto CARMAC, del Programa de Cooperación Territorial- MAC. El proyecto CARMAC tiene como objetivo la búsqueda de soluciones sostenibles para preservar la calidad de las aguas recreativas y costeras. En este marco, el SDN de Santa Lucía está siendo utilizado como caso de estudio con el que evaluar si las tecnologías de depuración de bajo coste implantadas en el mismo son aplicables a zonas residenciales y comunidades costeras con carencias en materia de saneamiento y depuración, a fin de fomentar la reutilización de aguas depuradas y lograr el vertido cero.

En el presente documento se expone los principales resultados alcanzados tras 2 años y medio de seguimiento, en los que por diversos motivos, el SDN ha estado sometido a altas cargas contaminantes pero bajo unas condiciones climatológicas suaves como son las de las Islas Canarias. La evolución experimentada por el SDN así como, el proceso de integración ambiental y social que ha tenido lugar en torno al mismo, contribuirá a la divulgación de esta tecnología en las islas.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

El área de influencia del SDN de Santa Lucía comprende diversos caseríos y barrios rurales del entorno de la Villa de Santa Lucía que representan unos 1.000 habitantes. Sin embargo, el SDN fue diseñado para tratar solamente una parte de las aguas residuales producidas, concretamente una carga de 100 habitantes equivalentes y un caudal medio diario de 12,5 m<sup>3</sup>. Esta decisión partió del hecho de que ya existía una estación depuradora convencional de lodos activos, ubicada a 20 km de distancia, donde se enviaban por medio de una conducción las aguas de estos núcleos rurales. Sin embargo, el mantenimiento deficiente de la tubería de transporte de estas aguas obligó al SDN a tratar un volumen extra de aguas residuales no previsto y a operar fuera de condiciones de diseño.

### 2.1. Descripción del sistema de tratamiento

La red de saneamiento es unitaria, por lo que el sistema de tratamiento de aguas residuales dispone de una arqueta de recepción con rebosadero para las pluviales. El pretratamiento consta exclusivamente de una reja de desbaste de 2 cm de luz de paso. En cuanto al tratamiento primario, consta de dos elementos en serie: el primero, una vieja fosa séptica, anterior a la construcción del SDN, de 50 m<sup>3</sup> de capacidad total y el segundo elemento es un tanque Imhoff prefabricado de 15 m<sup>3</sup> para 100 habitantes equivalentes. El efluente del tanque Imhoff pasa a una cámara de acumulación de unos 6 m<sup>3</sup> para su posterior descarga y contigua a esta cámara, existe una arqueta para medir caudales y para la derivación de las aguas residuales hacia diferentes zonas del tratamiento secundario. Esta cámara alimenta a cada uno de los humedales artificiales de flujo vertical (VFCW) y a un rebose de emergencia hacia el humedal de flujo horizontal (HFCW), antes posibles obstrucciones de las conducciones de descarga a los humedales verticales. Cada una de las conducciones de salida de la cámara de acumulación dispone de caudalímetros electromagnéticos que permiten conocer el caudal diario tratado por el sistema.

Por su parte, el tratamiento secundario consta de dos etapas. En una primera, dispone de dos humedales artificiales de flujo vertical paralelos (VFCW) de 150 m<sup>2</sup> de superficie cada uno. Dichos humedales representan un elemento novedoso en Canarias y diferenciador, pues ningún otro SDN construido anteriormente dispone de ellos. Los áridos utilizados en la construcción de ambos VFCW fueron grava de 30-32 mm en la zona de drenaje y grava de 3-8 mm en el resto del sistema. Su característica principal es que su diseño prevé que operen de manera discontinua para favorecer la aireación del sustrato y de la película biológica adherida, entre descarga y descarga. Para conseguir el flujo discontinuo, se instaló un sifón invertido para cada humedal ubicado dentro de la cámara de acumulación previa. Sin embargo, problemas operacionales de dicho sifón ha llevado a que ambos VFCW hayan operado en continuo estos primeros años, si bien de forma alternativa, por períodos de aproximadamente un mes cada uno. Esta forma de funcionar junto con la no implantación de plantas en los humedales, ha facilitado las tareas de mantenimiento en el humedal en reposo (rastrillado y retirada de la costra en superficie). La siguiente etapa del tratamiento secundario consiste en un humedal artificial de flujo horizontal (HFCW) de 300 m<sup>2</sup> plantado con *Typha latifolia*, originaria del barranco de Tirajana. El HFCW recibe tanto los efluentes de cada VFCW como de los posi-

bles reboses de la cámara de acumulación. Dicho HFCW opera de forma continua manteniendo el nivel de agua unos 5 cm por debajo de la superficie del sustrato. El árido utilizado ha sido grava de machaqueo de material fonolítico con granulometrías de 40-80 mm en la zona de cabecera y drenaje al final del sistema, y de 4-12 mm en la zona central del lecho. Como tareas de mantenimiento se ha establecido la realización de dos cortes de *Typha* al año, por su utilidad en el sector artesanal local y su recolección en el medio natural es a veces, complicada. Durante los cortes de vegetación los mejores tallos y hojas desechados para artesanía se han utilizado como cama para ganado estabulado, principalmente vacuno, de manera que la *Typha* es incorporada al estiércol producido que es posteriormente, aplicado en agricultura.

La etapa final del SDN es una laguna de almacenamiento de agua depurada que puede ser vertida o podría ser reutilizada.

## 2.2. Frecuencia y puntos de muestreo

Como ya se ha indicado, la evolución del agua residual en su recorrido a través del SDN de Santa Lucía ha sido monitorizada desde su puesta en marcha, en varios puntos del mismo, que aparecen indicados en la Figura 1.

Además de los muestreos realizados puntualmente en los puntos señalados, se han realizados muestreos automáticos en los puntos 1 y 6 con el apoyo de equipos automáticos por períodos de 24 horas, tanto en días laborables como fines de semana. Con dichos muestreos se ha intentado definir las previsible variaciones de carga contaminante diarias y semanales experimentadas por el sistema, ya que Santa Lucía es un lugar muy visitado en fines de semana y el sector de la restauración es relativamente importante en el lugar. Asimismo, estos muestreos han permitido conocer la influencia de las fluctuaciones de la alimentación sobre la capacidad de depuración del sistema y la calidad del efluente del HFCW.

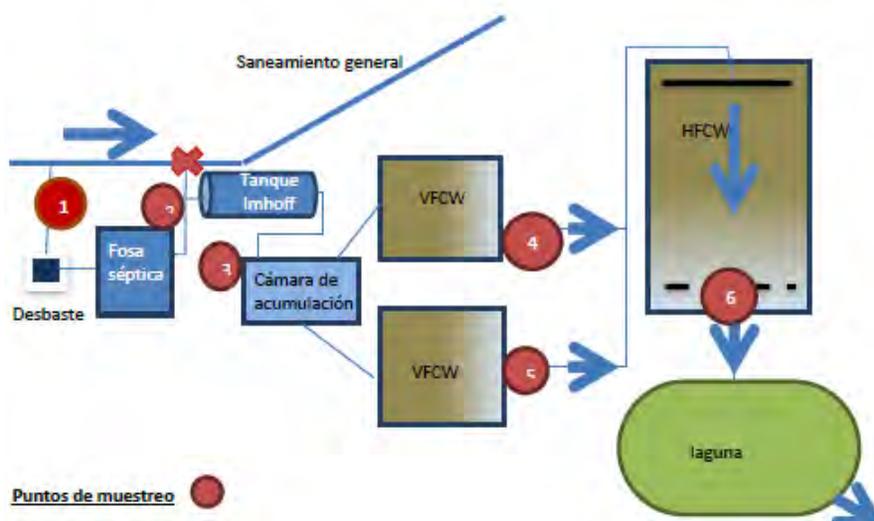


Fig. 1; Distribución de los puntos de muestreo utilizados durante el seguimiento de la planta

Los parámetros físico-químicos evaluados en cada muestra han sido: DBO5, DQO, SST, pH, Conductividad eléctrica, Turbidez, Agentes tensoactivos, Aceites y grasas, Nitrógeno total, Amonio, Nitrato y Fósforo total. En cuanto a los parámetros microbiológicos, han sido coliformes totales, enterococos intestinales y *Escherichia coli*. Además, se ha realizado el seguimiento correspondiente del efluente a fin de constatar el cumplimiento del Real Decreto 1620/2007, que regula los requerimientos de calidad a las aguas regeneradas con fines de reutilización (BOE, 2007). Asimismo, en este mismo efluente se evaluaron parámetros agronómicos como cloruros, sodio, potasio, calcio, magnesio, boro, bicarbonatos y huevos de nematodos intestinales para establecer posibles riesgos en caso de reutilizarlo en riego de suelos y cultivos.

En cuanto al seguimiento de las condiciones meteorológicas, la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) aportó datos de la pluviometría y las temperaturas registradas en dos estaciones meteorológicas próximas al SDN (Santa Lucía casco y Valsequillo-Los Mocanes) con el fin de analizar la influencia de dichas variables sobre la capacidad de tratamiento del sistema.

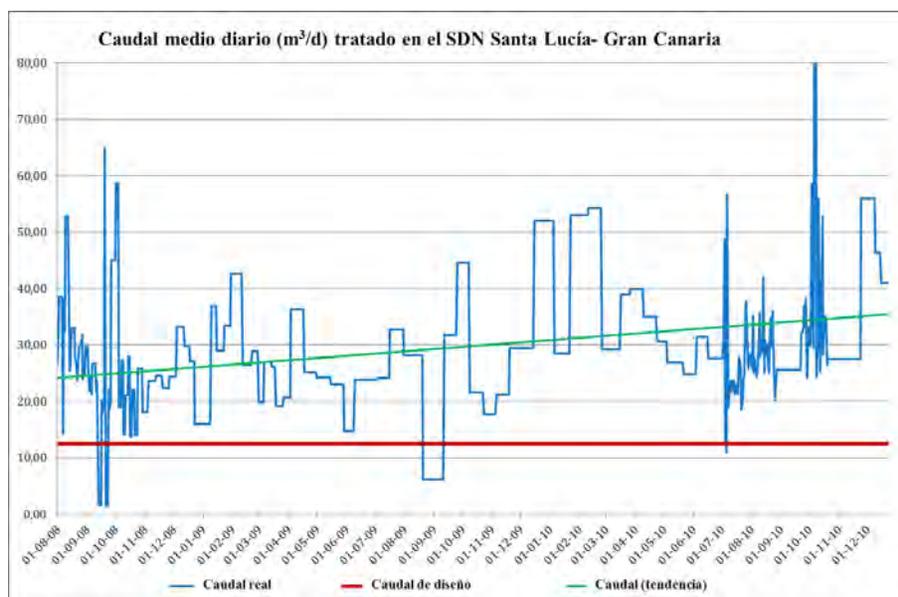
En cuanto al seguimiento de las condiciones meteorológicas, la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) aportó datos de la pluviometría y las temperaturas registradas en dos estaciones meteorológicas próximas al SDN (Santa Lucía casco y Valsequillo-Los Mocanes) con el fin de analizar la influencia de dichas variables sobre la capacidad de tratamiento del sistema.

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **3.1. Operación del sistema**

Durante el período en que el SDN de Santa Lucía ha sido evaluado (aproximadamente 880 días) el volumen de aguas residuales tratado ha aumentado, pasando de unos 9.500 m<sup>3</sup> totales en el primer año (entre diciembre 2008 y noviembre 2009) a 13.000 m<sup>3</sup> el segundo año. De esta manera, el flujo medio diario durante 2009 fue de 26,9 m<sup>3</sup>, mientras que durante 2010 fue de 34,4 m<sup>3</sup>, produciéndose un incremento del 27,6 % (Figura 2). Todo ello muestra que el SDN ha sido sometido a un caudal medio muy superior al de su diseño (12,5 m<sup>3</sup>/d) que en invierno, al no disponerse de redes segregadas de recogida de pluviales, se ha visto ampliamente superado ante las lluvias, especialmente durante el segundo año.

La Tabla 1 presenta las características físico-químicas y microbiológicas del agua residual ingresada al SDN, en el punto de muestreo nº 1. Tal y como se desprende de estos datos, la carga contaminante media fue 23 kg DBO5/d y el índice medio de biodegradabilidad,  $0,5 \pm 0,1$ . Por tanto, la concentración del agua residual se corresponde a “fuerte-muy fuerte” pero biodegradable. Los coeficientes de variación (CV), expresados en porcentaje, fueron relativamente altos (51% para la DBO5 y 70% para los SST).



**Fig. 2;** Evolución de los caudales diarios tratados por el SDN de Santa Lucía a lo largo del período agosto 2008- diciembre 2010

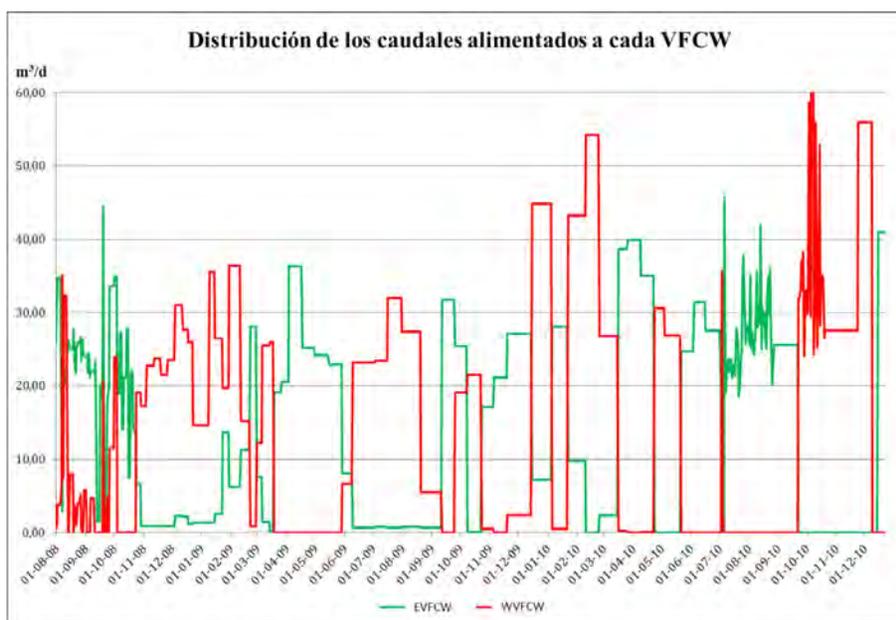
**Tabla 1.** Características medias del agua residual alimentada en cabecera y al Tanque Imhoff del SDN de Santa Lucía (puntos 1 y 2 de Figura 1).

Parámetros	Influyente al SDN (punto 1)	Influyente al tanque Imhoff (punto 2)
<b>DBO<sub>5</sub> (mg/L)</b>	697±353 (n= 14)	418±121 (n= 99)
<b>DQO (mg/L)</b>	1.257±492 (n= 14)	761±236 (n= 103)
<b>SST (mg/L)</b>	423±295 (n= 14)	302±167 (n= 103)
<b>Turbidez (NTU)</b>	404±284 (n= 9)	273±121 (n= 99)
<b>Nitrógeno total (mg/L)</b>	116±33 (n= 13)	98±23 (n= 98)
<b>Amonio NH<sub>4</sub> (mg/L)</b>	93±16 (n= 13)	81±14 (n= 99)
<b>Fósforo total (mg/L)</b>	15±5 (n= 13)	13±3 (n= 98)
<b>Surfactantes (mg/L)</b>	8,5±3 (n= 4)	7,8±0,4 (n= 3)
<b>Aceites y grasas (mg/L)</b>	29±41 (n= 4)	10±2 (n= 3)
<b>Coliformes totales (UFC/100ml)</b>	6,1·10 <sup>6</sup> (n= 3)	4,40·10 <sup>6</sup> (n= 31)
<b>Enterococos intestinales (UFC/100ml)</b>	2,05·10 <sup>6</sup> (n= 4)	1,80·10 <sup>6</sup> (n= 7)
<b>E. coli (UFC/100ml)</b>	3,2·10 <sup>6</sup> (n= 4)	2,00·10 <sup>6</sup> (n= 31)
<b>pH</b>	7,8±0,4 (n= 14)	7±0,2 (n= 103)
<b>Conductividad (µS/cm)</b>	1.618±239 (n= 14)	1.450±184 (n= 101)

n= número de muestras

En cuanto al papel de la fosa séptica, las muestras analizadas correspondientes al punto n° 2, confirman un tiempo de retención hidráulica de al menos 1 día, lo cual es suficiente para lograr la homogeneización del influente a las etapas posteriores. De hecho, los coeficientes de variación fueron menores a las del agua residual original, 29% para DBO5 y 55% para SST. La eficacia de eliminación de contaminantes en la fosa séptica alcanza el 40% en la materia orgánica biodegradable, 30% en sólidos en suspensión, más del 10% en Nitrógeno y Fósforo y 8% en Agentes tensoactivos. El rendimiento de reducción más destacado se obtiene en aceites y grasas, superior al 60%, mientras que los indicadores microbiológicos prácticamente no se ven afectados por su paso por la fosa séptica.

Como ya se ha explicado anteriormente, los humedales artificiales de flujo vertical (VFCWs) no operaron en paralelo de manera intermitente, como hubiese sido deseable, sino que han operado por períodos aproximados de 30 días de manera alterna, tal y como se observa en la Figura 3. Por ello, en la Tabla 2 se puede observar que los días de operación de cada uno y los caudales medios tratados divergen un poco según se trate del humedal oriental (EVFCW) o del occidental (WVFCW). La diferencia ante los caudales tratados también ha afectado, aunque de manera leve, a los resultados analíticos obtenidos en el efluente de cada VFCW.



**Fig. 3;** Evolución de los caudales tratados por cada VFCW a lo largo del período: agosto 2008- diciembre 2010

Por otra parte, hemos de indicar que un seguimiento analítico quincenal realizado durante un período de 4 meses entre los puntos 2 y 3 de la Figura 1 (influyente y efluente del tanque Imhoff) ha confirmado la casi nula capacidad depurativa de este equipo, visto que sus características de diseño no se corresponden con las condiciones reales de operación del SDN. Esto unido al hecho de que el acceso a la arqueta de entrada al tanque Imhoff es mejor y más segura, se ha asumido que las características del influyente al tanque Imhoff son similares a las del influyente a los humedales de flujo vertical a la hora de evaluar el rendimiento de depuración de dichos VFCW. Partiendo de esto, los rendimientos promedios de depuración detectados entre el tanque Imhoff y los VFCW (entre los puntos 2 y 4 o 5, según el humedal) se sitúan en torno al 65-70 % en reducción de DBO<sub>5</sub>, 55-60% en DQO, >80% en SST, entre 60-70% en Turbidez, 20-30% en Nitrógeno total, 30-48% en Amonio y 15-20% en Fósforo total. Es de destacar la variabilidad en la calidad de los efluentes de los VFCW, sobre todo en los indicadores básicos de depuración (DBO<sub>5</sub>, DQO, SST y Nitrógeno total). En cuanto al Amonio y Fósforo total, sí se detecta una mayor estabilidad en los resultados.

**Tabla 2.** Resumen del caudal y de la calidad media de los efluentes de ambos VFCW (puntos de muestreos 4 y 5 de la Figura 1).

Parámetros	Efluente EVF-CW (punto 4)	Efluente WVF-CW (punto 5)
Caudal diario medio teórico (m <sup>3</sup> /d)	12,5	12,5
Caudal diario medio real (m <sup>3</sup> /d) en días operativos (> 1 m <sup>3</sup> /d), N=días operativos	20,7±11 (N=600)	26,1±15 (N=504)
Flujo total tratado durante el periodo de estudio (m <sup>3</sup> )	12.400 (48,5 %)	13.200 (51,5%)
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	146±79 (n=61)	127±72 (n=49)
DQO (mg/L)	332±146 (n=68)	298±131 (n=56)
SST (mg/L)	49±29 (n=73)	50±45 (n=58)
Turbidez (NTU)	104±64 (n=71)	79±56 (n=56)
Nitrógeno total (mg/L)	75±37 (n=71)	67±37 (n=57)
Amonio NH <sub>4</sub> (mg/L)	57±16 (n=68)	42±21 (n=56)
Fósforo total (mg/L)	11±3 (n=66)	10±3 (n=54)
pH	7,3±0,3 (n=71)	7,4±0,4 (n=58)
Conductividad (μS/cm)	1.423±198 (n=71)	1.433±249 (n=58)

n= número de muestras

EVFCW: VFCW oriental

WVFCW: VFCW occidental

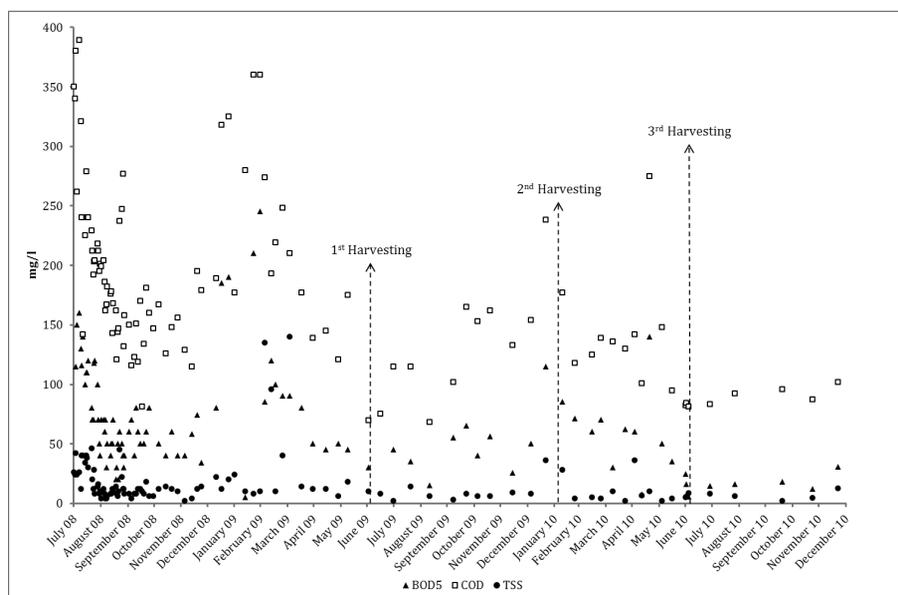
Tras su paso por los humedales de flujo vertical, el agua residual ingresa al humedal de flujo horizontal donde culmina su tratamiento. En la Tabla 3 se exponen los valores medios de diversos parámetros evaluados en el efluente del HFCW (punto 6 de la Figura 1) en dos períodos diferenciados. Un primer período de estabilización del sistema, de aproximadamente 8 meses de duración y un segundo período donde el comportamiento del humedal ha sido más estable. A dicha estabilización, además de la propia maduración y adaptación del humedal ha contribuido la mejora en las prácticas y la regularidad del mantenimiento y vigilancia de las etapas previas del SDN (desbaste, fosa, descarga desde la cámara de acumulación, etc.).

**Tabla 3.-** Resumen de la calidad del efluente del HFCW en dos períodos de seguimiento consecutivos (puntos de muestreo 6)

Parámetros	Sept 2008 – marzo 2009	Abril 2009-dic 2010
DBO (mg/L)	79±47 (n=66)	46±29 (n=35)
DQO (mg/L)	205±70 (n=71)	128±45 (n=36)
SST (mg/L)	21±25 (n=71)	9±8 (n=36)
Turbidez (NTU)	113±83 (n=71)	80±54 (n=29)
Nitrógeno total (mg/L)	45±12 (n=67)	53±12 (n=28)
Amonio NH <sub>4</sub> (mg/L)	37±10 (n=66)	49±13 (n=31)
Fósforo total (mg/L)	9±2 (n=71)	8±2 (n=31)
pH	8±0,3 (n=71)	7,4±0,2 (n=36)
Conductividad (µS/cm)	1.412±206 (n=70)	1.443±316 (n=35)

Como se observa en la Tabla 3, durante el segundo período de operación el efluente del humedal de flujo horizontal (HFCW) han presentado valores menores de DBO<sub>5</sub>, DQO, SST y Turbidez. Sin embargo, las formas nitrogenadas han empeorado levemente, sobre todo el amonio.

A lo largo del estudio se han realizado 3 cosechados de la *Typha* implantada en el humedal de flujo horizontal (HFCW), en las fechas mostradas en la Figura 4. Como puede observarse en dicha figura, los principales indicadores de contaminación en el efluente del humedal de flujo horizontal se han ido estabilizando como ya se ha indicado, a partir de abril de 2009, pero el efecto del cosechado de la *Typha* no ha sido especialmente notable. Así, tras las cosechas realizadas a principio de verano se ha detectado una mejora en los indicadores de contaminación en los efluentes, coincidiendo con los meses más cálidos, situación que no se ha producido cuando se ha realizado en invierno. Esta diferencia de comportamiento del humedal posiblemente tiene relación no sólo con el ciclo vegetativo de las plantas, que bajo la influencia de temperaturas más cálidas favorece la asimilación de materia orgánica y nutrientes por las plantas sino también, a la influencia de la temperatura ambiental en el proceso de depuración biológica.



**Fig. 4;** Evolución de la calidad del efluente del HFCW

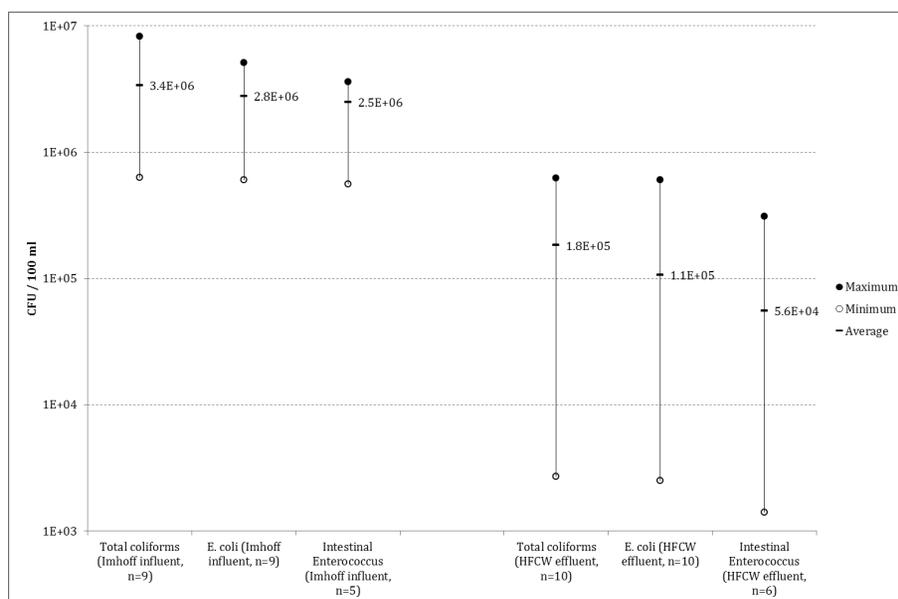
En el primer año de seguimiento, la precipitación total anual fue 169,5 l/m<sup>2</sup>, con un máximo de 47,5 l/m<sup>2</sup> .d, y en el segundo año, fueron 612,4 l/m<sup>2</sup> y 137 l/m<sup>2</sup> .d, respectivamente. Las temperaturas diarias promedio máxima y mínima fueron 24,1 °C y 13 °C, respectivamente. El mes más cálido en el periodo de estudio fue julio de 2009 y el período más frío, entre diciembre de 2008 y enero de 2009. La temperatura máxima diaria de los mínimos medidos, durante dos años, fue de 15 ° C. Estos datos confirman que los humedales, tanto los verticales como el horizontal, no han sufrido temperaturas extremadamente frías a lo largo del período analizado. Este hecho parece haber sido determinante para que a pesar de la sobrecarga hidráulica y de contaminantes sufrida por el SDN, éste haya podido alcanzar rendimientos de operación realmente notables y significativos, como se observa en la tabla 4.

**Tabla 4.** Resumen de eficacias medias de eliminación (%) de diferentes parámetros alcanzados en cada etapa y en el sistema global, en el último año.

Parámetro	Global	Entrada fosa séptica	Salida VFCW	Salida HFCW
DBO <sub>5</sub>	93±6	36±22	71±17	49±37
DQO	89±6	34±21	64±20	41±46
SST	98±2	38±53	76±23	63±44
Nitrógeno Total	61±21	18±24	33±16	21±28
Amonio	48±12	13±19	34±24	15±13
Fósforo total	47±16	20±24	28±17	8±18

En general, los rendimientos de eliminación del SDN global en lo que se refiere a los indicadores de contaminación de materia orgánica y sólidos en suspensión son óptimos y, relativamente estables, en comparación con los logrados en instalaciones similares (Salas et al., 2008). En cuanto al nitrógeno y el fósforo totales, estos rendimientos son menos estables, pero similares o superiores a los de otros sistemas de depuración como la aireación prolongada o los filtros percoladores (Ortega et al, 2010). De hecho, tomando en consideración exclusivamente, los datos de rendimiento en términos de ambos nutrientes, los humedales del SDN de Santa Lucía han logrado valores similares o ligeramente inferiores a los de estudios previos (Ortega et al, 2010; Salas et al, 2008). En cuanto al Amonio, el rendimiento observado ha sido inferior al obtenido en otros sistemas similares (Ortega et al, 2010; Salas et al, 2008). Mientras, la eliminación de surfactantes y aceites y grasas fue del 90% y prácticamente del 100%, respectivamente.

En cuanto a la evolución de los indicadores microbiológicos en el sistema, se han alcanzado reducciones de hasta 3 unidades logarítmicas, aunque sólo de manera puntual (Figura 5). Por lo general, humedales artificiales de características similares han permitido reducciones de 1 o 2 unidades logarítmicas (Ortega et al., 2010). En el SDN de Santa Lucía, los mejores resultados de eliminación se han obtenido para el caso de los enterococos intestinales, mientras que los huevos de nematodos intestinales han sido detectados únicamente en dos de los cinco muestreos realizados en el efluente del sistema.



**Fig. 5;** Evolución de los indicadores de contaminación microbiológicos en los puntos de muestreo 2 y 6 (datos obtenidos entre mayo-agosto 2010).

Es importante destacar que a pesar de la sobrecarga a que han sido sometidos, por encima de los valores recomendados en la literatura especializada, el rendimiento de eliminación más significativo de los parámetros evaluados, ha sido logrado por la etapa constituida por los VFCW. En base a esto y al bajo ratio  $m^2/habitante\ equivalente$  con que han operado, es previsible que a corto-medio plazo pueda presentarse algún episodio de colmatación (clogging) del sustrato, si bien hasta el momento parece que los prolongados períodos de reposo a que son sometidos los humedales permiten la regeneración de los lechos.

En lo que respecta a la variabilidad observada en el rendimiento de eliminación de cada etapa del sistema, esta parece depender de múltiples factores, como la estacionalidad y la calidad del influente a tratar. Sin embargo, a pesar de dicha variabilidad, el rendimiento global del sistema se ha mantenido prácticamente constante a lo largo del período de estudio, lo que parece suponer una buena complementariedad de las diversas etapas que componen el sistema.

### **3.2. Potencial de reutilización del agua depurada**

De cara a establecer los posibles usos del agua depurada por el SDN de Santa Lucía es necesario remitirse al Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, *por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas en España*. Los parámetros principales que se contemplan en dicha ley para definir los usos posibles serían: Turbidez, Sólidos en suspensión, *Escherichia coli* y presencia de huevos de Nematodos intestinales. Es destacable que el contenido medio de Sólidos en suspensión a la salida del HFCW (10 mg/L), durante el último año de estudio, se encuentra por debajo de los valores máximos admisibles para la mayoría de los usos previstos en la ley. En este caso, el indicador *Escherichia coli* es uno de los más limitantes, ya que el valor final promedio se sitúa en el rango superior a 10.000 UFC/100 ml. Respecto a los nematodos intestinales, se han detectado en torno a 1 huevo/L en algunos muestreos.

En base a lo anterior, los usos permitidos del agua depurada por el SDN de Santa Lucía serían:

- Aporte a estanques, masas de agua y caudales circulantes ornamentales, en los que está impedido el acceso del público al agua
- Riego de bosques, zonas verdes y de otro tipo no accesibles al público
- Silvicultura

No obstante, dichos usos podrían ser ampliables en caso de asegurar la ausencia de nematodos intestinales a los siguientes:

- Riego localizado de cultivos leñosos que impida el contacto del agua regenerada con los frutos consumidos en la alimentación humana

- Riego de cultivos de flores ornamentales, viveros, invernaderos sin contacto directo del agua regenerada con las producciones
- Riego de cultivos industriales no alimentarios, viveros, forrajes ensilados, cereales y semillas oleaginosas

En cuanto a la calidad agronómica del agua depurada por el SDN, y tomando como referencia la interpretación del riesgo que supone su uso para el riego de suelos cultivados con especies vegetales de Ayers y Wescot (1985), no hay riesgo asociado a su uso para riego superficial por boro o cloruros. En cambio, existe restricción moderada de uso por la Conductividad y el SAR conjuntamente y por el sodio. En caso de riego por aspersión, la restricción de uso sería severa por la presencia de bicarbonatos y ligera por los cloruros.

#### 4. CONCLUSIONES

- El SDN de Santa Lucía es un caso de estudio interesante y poco común para obtener información de sistemas de estas características y dimensiones ubicados en regiones subtropicales, máxime considerando el hecho de que el caudal medio de aguas residuales tratado por dicho sistema ha sido casi el triple del caudal de diseño.
- A pesar de la sobrecarga hidráulica y de contaminantes a que ha sido sometido el SDN, los rendimientos globales de depuración han sido óptimos en cuanto a eliminación de materia orgánica biodegradable (93%), DQO (89%), sólidos suspendidos (98%), nitrógeno (61%) y fósforo total (47%). Asimismo, se ha observado una reducción prácticamente completa de surfactantes, así como de aceites y grasas. Desde el punto de vista de la contaminación microbiológica, la reducción aportada por el conjunto de humedales ha oscilado entre 0,9 y 2,6 unidades logarítmicas para los diferentes indicadores analizados.
- Probablemente, las temperaturas suaves han contribuido favorablemente al proceso de depuración en los humedales artificiales. De hecho, es probable que los requerimientos de superficie por habitante-equivalente para este tipo de sistemas sea inferior a los encontrados en la bibliografía y experiencias a latitudes más frías o extremas.
- Además, se ha observado que la combinación de al menos dos humedales de flujo vertical en cabecera del sistema para uso alternativo contribuye a obtener óptimos rendimientos de depuración y a alargar la vida útil de los humedales, ya que los largos tiempos de reposo parecen propiciar su regeneración.
- Por otra parte, la no utilización de macrófitas en los humedales puede contribuir a facilitar las tareas periódicas de limpieza y retirada de fango seco.

- El estudio también ha permitido constatar a los operadores del SDN la importancia de las tareas de mantenimiento, a pesar de ser sencillas, para el buen funcionamiento del sistema.

### **AGRADECIMIENTOS**

Los autores de este trabajo desean agradecer la cofinanciación recibida al amparo de los programas de la Unión Europea, Interreg Espacio Atlántico y Programa Territorial de Cooperación, que en el marco de los proyectos DEPURANAT (2004-2006) y CARMAC (2009-2012), respectivamente ha permitido la construcción y monitorización del SDN de Santa Lucía. Asimismo, deseamos agradecer a la Mancomunidad Intermunicipal del Sureste de Gran Canaria, a Acciona Agua y al ayuntamiento de Santa Lucía su colaboración y apoyo para la realización de los trabajos de seguimiento.

### **REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA**

- Aragón, C., Salas, J.J., Ortega, E. and Ferrer Y. (2011). Lacks and needs of R&D on wastewater treatment in small populations. *Water Practice and Technology*, IWA 2011.
- Ayers, RS & Westcot, DW 1985, *Water Quality for Agriculture, Irrigation and Drainage Paper 29 Rev. 1*, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.
- BOE (2007). Boletín Oficial del Estado nº 194. Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.
- Díaz, R., 2005. Evaluación de peligros y riesgos de contaminación de las aguas subterráneas. In: Instituto Tecnológico de Canarias, Cabildo de Lanzarote (Eds.), *Técnicas y Métodos para la Gestión sostenible del Agua*. Proyecto AQUAMAC. Islas Canarias- Spain, pp. 335-373.
- Ortega, E., Ferrer, Y., Salas, J.J., Aragón, C., Real, A. (2010). *Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas comunidades*. Ministerio de Medio Ambiente Rural y Marino. ISBN: 978-84-491-1071-9
- Salas, J.J., Martel, G., Vera, L. and Sardón, N., (2008). Fundamentos de los sistemas de depuración natural (SDN). Tecnologías disponibles. In: *Gestión sostenible del agua residual en entornos rurales*. PROYECTO DEPURANAT. NETBIBLO, S.L. ISBN: 978-84-9745-383-7.
- Ramón, A. (2008). Metodología para la realización de los mapas de potencial para la implantación de SDN. Caso práctico para las islas de Gran Canaria y Tenerife (Islas Canarias). In: *Gestión Sostenible del Agua Residual en Entornos Rurales*. PROYECTO DEPURANAT. NETBIBLO, S.L., ISBN: 978-84-9745-383-7. La Coruña- Spain.
- Vera, L., Martel, G., Gutiérrez, J., Márquez, M., Abreu Acosta, N., Salas, J.J., Sardón, N., Herrera, J.A., Aguiar, M.E., Rexachs, J.A., Brito, A.G., Nogueira, R., Ribeiro, D., Martins, G. and Cunha, J. (2008). Evaluación de los Sistemas de Depuración Natural. In: *Gestión sostenible del agua residual en entornos rurales*. PROYECTO DEPURANAT. NETBIBLO, S.L. ISBN: 978-84-9745-383-7.
- Vera, L., Martel, L., Salas, J.J., Sardón, N., Nogueira, R., Brito, A.G., Faby, J.A. and Ramón, A. (2009). Depuranat project: sustainable management of wastewater in rural areas. *Desalination and Water Treatment*, 4, 59-68.



## LOS TRABAJOS DEL PROGRAMA CONSOLIDER-TRAGUA EN GRAN CANARIA: ESTUDIO DE LA AFECCIÓN AL MEDIO POR LA REUTILIZACIÓN DE AGUAS REGENERADAS EN LA CUENCA DEL BARRANCO DE LAS GOTERAS

Estévez, Esmeralda. Departamento de Física. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. España.  
*eeestevez@proyinves.ulpgc.es*

Cabrera, M<sup>a</sup> del Carmen . Departamento de Física. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. España.

Palacios-Díaz, M<sup>a</sup> del Pino . Departamento de Física. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. España.

Annetty Benavides. Dpto. de Física. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Las Palmas de Gran Canaria.

Cruz-Fuentes, Tatiana. Departamento de Física. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

Hernández-Quesada, M<sup>a</sup> del Pilar. Departamento de Física. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. España.

Mendoza-Grimón, Vanesa. Departamento de Patología Animal, Producción Animal y Ciencia y Tecnología de los Alimentos. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. España.

Fernández-Vera, Juan Ramón. Laboratorio Fitopatológico y Agroalimentario. Cabildo Insular de Gran Canaria. España.

Hernández-Moreno, José Manuel. Departamento de Edafología y Geología. Universidad de La Laguna. España.

**RESUMEN:** En España el uso de aguas regeneradas está muy extendido y se practica desde hace décadas. A pesar del elevado déficit hídrico, el volumen de aguas regeneradas en España no supera el 5% del total de las aguas residuales producidas, aunque en Canarias ha alcanzado el 20% de los recursos hídricos consumidos. En la cuenca del Barranco de Las Goteras (Noreste de Gran Canaria) se riega el campo de golf de Bandama desde hace más de treinta años con aguas regeneradas. El Proyecto nacional CONSOLIDER-TRAGUA ha abordado de manera integrada los aspectos implicados en la reutilización. Su objetivo en Gran Canaria ha sido estudiar la incidencia al medio circundante del campo de golf y especialmente al acuífero subyacente. Entre las posibles consecuencias ambientales de la reutilización, la presencia de contaminantes emergentes en el agua subterránea está adquiriendo especial interés. Tras caracterizar el agua regenerada, el suelo y el sistema de riego del campo de golf, se ha comprobado la importancia del manejo del riego. Asimismo, se ha caracterizado cualitativamente el acuífero, se ha descrito el flujo subterráneo y se ha identificado la presencia de 80 contaminantes emergentes en el agua de riego y el agua subterránea. Además, se ha identificado la existencia de otras fuentes de contaminación o de entrada de contaminantes emergentes al acuífero, como son las fugas

desde fosas sépticas, las roturas en la red de alcantarillado, el riego con aguas regeneradas en otras parcelas agrícolas de la cuenca y la aplicación de productos fitosanitarios en las mismas.

## 1. INTRODUCCIÓN

El continuo descenso de volumen y calidad de las reservas naturales de agua dulce, junto con los principios de conservación del medio ambiente para un desarrollo sostenible, han dado lugar al planteamiento de soluciones alternativas para atenuar el déficit. Entre estas alternativas se encuentra la reutilización de aguas residuales (Figura 1), cuya contribución está en aumento gracias a los avances en los procesos de tratamiento que dan lugar a aguas regeneradas de calidades aceptables. Además, este recurso no convencional ofrece una garantía de suministro superior a la de las fuentes convencionales, especialmente en zonas semiáridas. Si se consideran los requisitos económicos y financieros de la reutilización, además del valor de las aguas regeneradas en el balance global de costes y beneficios ambientales, se puede concluir que este recurso puede competir con otras alternativas en muchos casos, sobre todo si se tiene en cuenta el concepto de sostenibilidad (Mujeriego 2009).

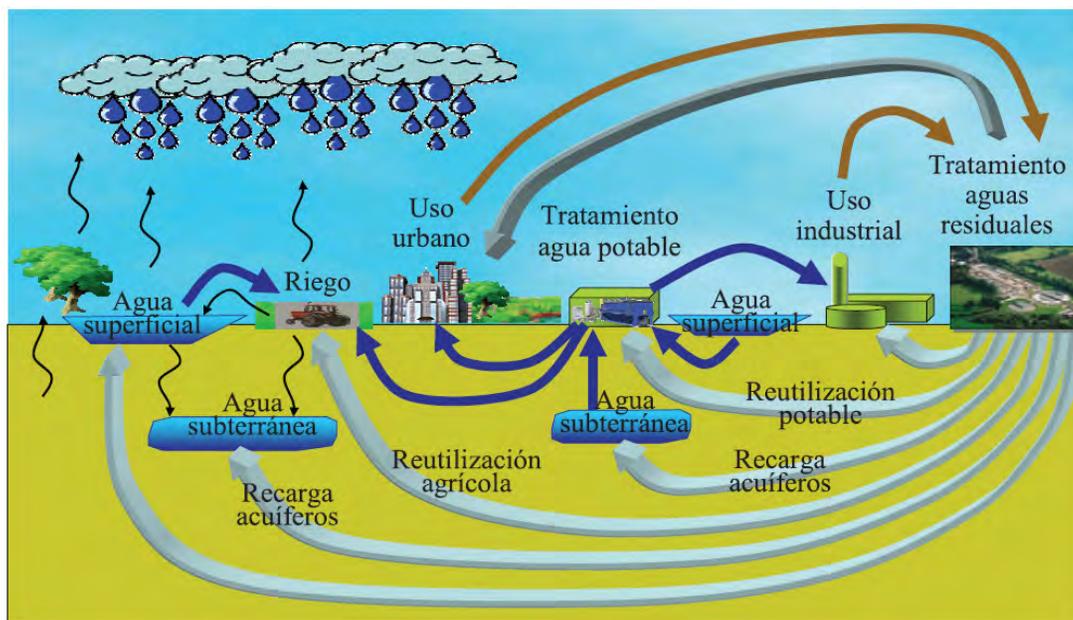
Debido a que la agricultura es la actividad que demanda más agua, el uso agrícola es la aplicación más extendida y constituye el destino principal del agua regenerada (Jiménez y Asano, 2008). En España el consumo medio estimado en el 2000 fue de 200 hm<sup>3</sup> (MIMAN, 2000). En las islas en que se reutiliza el agua regenerada, la principal aplicación es el riego, tanto agrícola como de campos de golf y parques y jardines (Delgado 2009).

En general, el uso de aguas regeneradas para el riego agrícola implica un aporte de nutrientes que permite reducir la cantidad de fertilizantes y modifica las características de los suelos (Marrero y Palacios 1996; Palacios et al 2005).

La aprobación en España del RD 1620/2007, de 7 de diciembre (BOE 2007), por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas (Anexo I), ha permitido disponer de un marco normativo con el que respaldar el uso del agua regenerada y potenciar la incorporación de la reutilización en los planes de gestión integrada de los recursos de las diversas cuencas. Este Real Decreto desarrolla la legislación pendiente tras la publicación del Plan Hidrológico Nacional (11/2005), a la vez que da cumplimiento a las exigencias del Reglamento de Dominio Público Hidráulico y transpone de la Directiva Marco del Agua (Directiva 2000/60/CE). En él se establecen indicadores de calidad en función del uso (urbano, agrícola o industrial) y se incorpora el concepto de agua regenerada (Tabla 1).

Gran parte de los usos contemplados tienen una afección, directa o indirecta, a los acuíferos. Además del uso del agua regenerada para recarga de acuíferos, el uso para el riego, sea de parques o jardines, campos de golf o agrícola, da lugar a que parte del agua utilizada llegue a los acuíferos en forma de retornos. Además, el mantenimiento de humedales y similares también puede suponer un aporte notable a los acuíferos en determinadas condiciones hídricas. Los criterios de calidad necesarios para estos usos son variables, pero en todos los casos se

refieren a los sólidos en suspensión, turbidez y contenido biológico, por lo que cada caso ha de ser estudiado por separado para que parámetros como la salinidad no sean un problema para los acuíferos.



**Figura 1;** Nuevo ciclo del agua. (Asano 1998, modificada por Delgado 2009)

**Tabla 1;** Definición de aguas regeneradas, aguas depuradas y reutilización de aguas según el RD 1620/2007, de 7 de diciembre.

AGUAS REGENERADAS	Aguas residuales depuradas que, en su caso, han sido sometidas a un proceso de tratamiento adicional o complementario que permite adecuar su calidad al uso al que se destinan
AGUAS DEPURADAS	Aguas residuales que han sido sometidas a un proceso de tratamiento que permita adecuar su calidad a la normativa de vertidos aplicable.
REUTILIZACIÓN DE LAS AGUAS	Aplicación, antes de su devolución al dominio público hidráulico y al marítimo terrestre para un nuevo uso privativo de las aguas que, habiendo sido utilizadas por quien las derivó, se han sometido al proceso o procesos de depuración establecidos en la correspondiente autorización de vertido y a los necesarios para alcanzar la calidad requerida en función de los usos a que se van a destinar

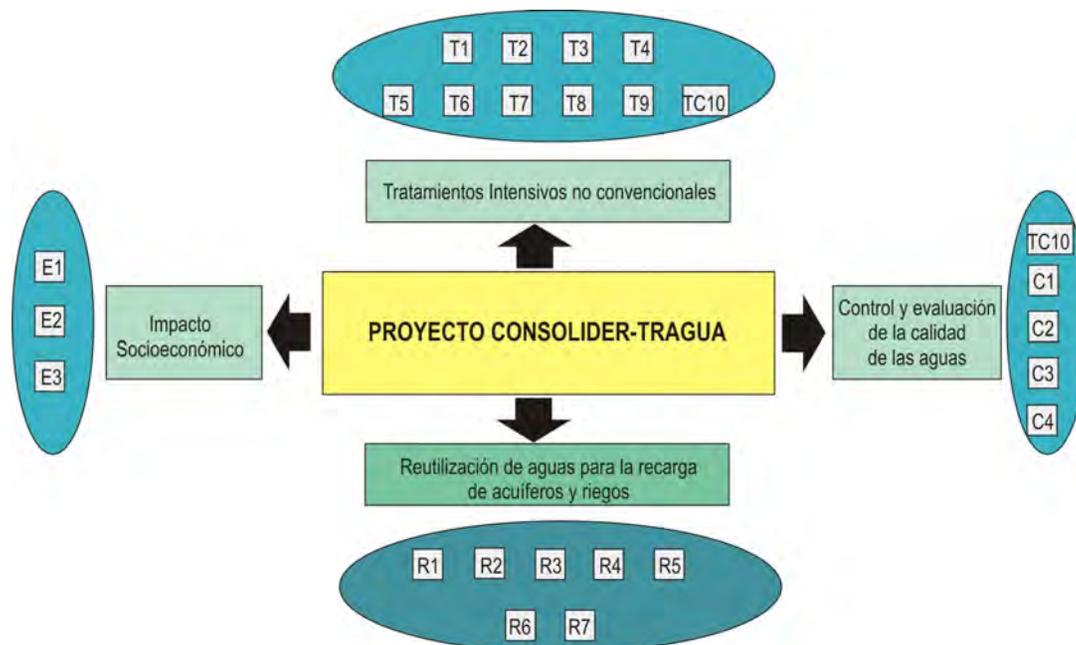
A pesar de que este RD ha surgido para respaldar y potenciar el uso del agua regenerada, está suponiendo un obstáculo debido a sus exigencias burocráticas, como son la adaptación de las concesiones por parte de los usuarios, o por los elevados costes del control analítico asociados a la elevada frecuencia de análisis requerida (Bravo 2009). Por otro lado, en el caso de la reutilización para riego agrícola, las calidades de agua exigidas no tienen en cuenta aspectos agronómicos ni las condiciones climáticas de la zona, el manejo del riego, las características del suelo o las tolerancias del cultivo a regar (Marrero y Palacios, 1996).

## **2. EL PROGRAMA CONSOLIDER TRAGUA**

El programa de investigación CONSOLIDER- TRAGUA: Tratamiento y reutilización de aguas residuales para una gestión sostenible (2006-2012), ha abordado de manera integrada los diferentes aspectos implicados en la reutilización de aguas residuales. Ha sido desarrollado por un sólido equipo pluridisciplinar formado por 24 grupos de investigación, que se agrupan en cuatro temáticas: Tratamientos intensivos en aguas residuales, Control y Evaluación de la Calidad de las Aguas, Reutilización de Aguas para al Recarga de Acuíferos y Riegos e Impacto Socioeconómico de la Reutilización (Figura 2). Como objetivos del Programa se contemplan la realización de un inventario de aguas residuales con potencial en reutilización, la obtención de protocolos de tratamiento en función de sus características y de las económicamente mejores tecnologías disponibles, métodos estándar de análisis químico, microbiológico y toxicológico, información sobre el impacto que las aguas tendrán sobre el medio y el correspondiente análisis económico. También contempla la creación de un programa de postgrado con al menos un máster reglado y un programa de doctorado.

Dentro del grupo dedicado a Reutilización de aguas para la recarga de acuíferos y riegos, se han llevado a cabo estudios concretos en diversos ambientes: filtros verdes y al riego de cultivos para la obtención de biodiesel en Sevilla; riego de chopos en Granada, inyección de agua regenerada en una barrera hidráulica contra la intrusión marina en el delta del Llobregat y afección por la utilización a medio-largo plazo en Gran Canaria (Cabrera et al. 2009; Cabrera et al. 2012).

Los trabajos desarrollados dentro del Programa CONSOLIDER-TRAGUA en Canarias se han enfocado en el estudio de las posibles afecciones al medio por la reutilización de aguas depuradas a medio y largo plazo. Para llevar a cabo los estudios se seleccionó el Campo de Golf de Bandama, que desde 1976 se riega con agua depurada de la EDAR de la ciudad de las Palmas de Gran Canaria. La principal ventaja de dicho emplazamiento es que se dispone de un largo historial de datos agronómicos del propio campo y que en todo momento se facilitó el acceso al mismo, la instalación de instrumentación y la toma de muestras por parte del Real Club de Golf de Las Palmas.



**Figura 2;** Esquema de los diferentes grupos que integran el Proyecto CONSOLIDER-TRAGUA (Cabrera et al, 2009a)

### 3. EL CASO DE GRAN CANARIA: EL RIEGO CON AGUAS REGENERADAS EN EL CAMPO DE GOLF DE BANDAMA

El campo de golf de Bandama es uno de los más antiguos de España. Fue fundado en 1891 con el nombre Las Palmas Golf Club y trasladado en 1957 al Llano de Bandama, pasando a denominarse desde entonces Real Club de Golf de Las Palmas (Hansen y Moreno 2008). Actualmente es visitado por unas 200 personas/día. El campo de golf está emplazado en la zona hidrológica N4 de la Planificación Hidrológica de Gran Canaria de 1999 (CIAGC 1999). Con una superficie de 41 km<sup>2</sup>, la zona comprende las cuencas hidrográficas del barranco principal de Las Goteras y de los barrancos secundarios: Sabinal y Gonzalo (Figura 3). La altitud varía desde un máximo aproximado de 850 m hasta el mar. En la zona alta la precipitación media es de 700 mm/año y en la costa 150 mm/año. Este campo de golf se localiza en el sector central de dicha cuenca (cotas 400-500 m), ocupando aproximadamente 0.3 km<sup>2</sup>. La precipitación y temperatura medias son de 300 mm/año y 19°C respectivamente, con un máximo de 22°C en el mes más cálido y 16°C en el más frío y con una humedad mínima del 78% en invierno y máxima del 85% en verano. La evapotranspiración (ET) calculada por Thornthwaite (Jensen et al. 1990) en la estación agroclimática más cercana y representativa, para el periodo 1961-1990, es de 746 mm (<http://sig.marm.es/siga/>).

La caracterización integral de la zona ha consistido en: un estudio geológico de detalle, una recopilación de la información hidrogeológica en el Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria y un inventariado de captaciones de agua subterránea de la cuenca en la que se encuentra

el campo de golf, a partir del cual se implantó una red de control trimestral (entre enero de 2009 y septiembre de 2011), para muestrear agua de riego y agua subterránea. La caracterización en profundidad del campo de golf se ha realizado mediante una campaña de tomografía eléctrica cuyos resultados están en fase de interpretación. Además, se han llevado a cabo varios muestreos de suelo y de agua lixiviada.

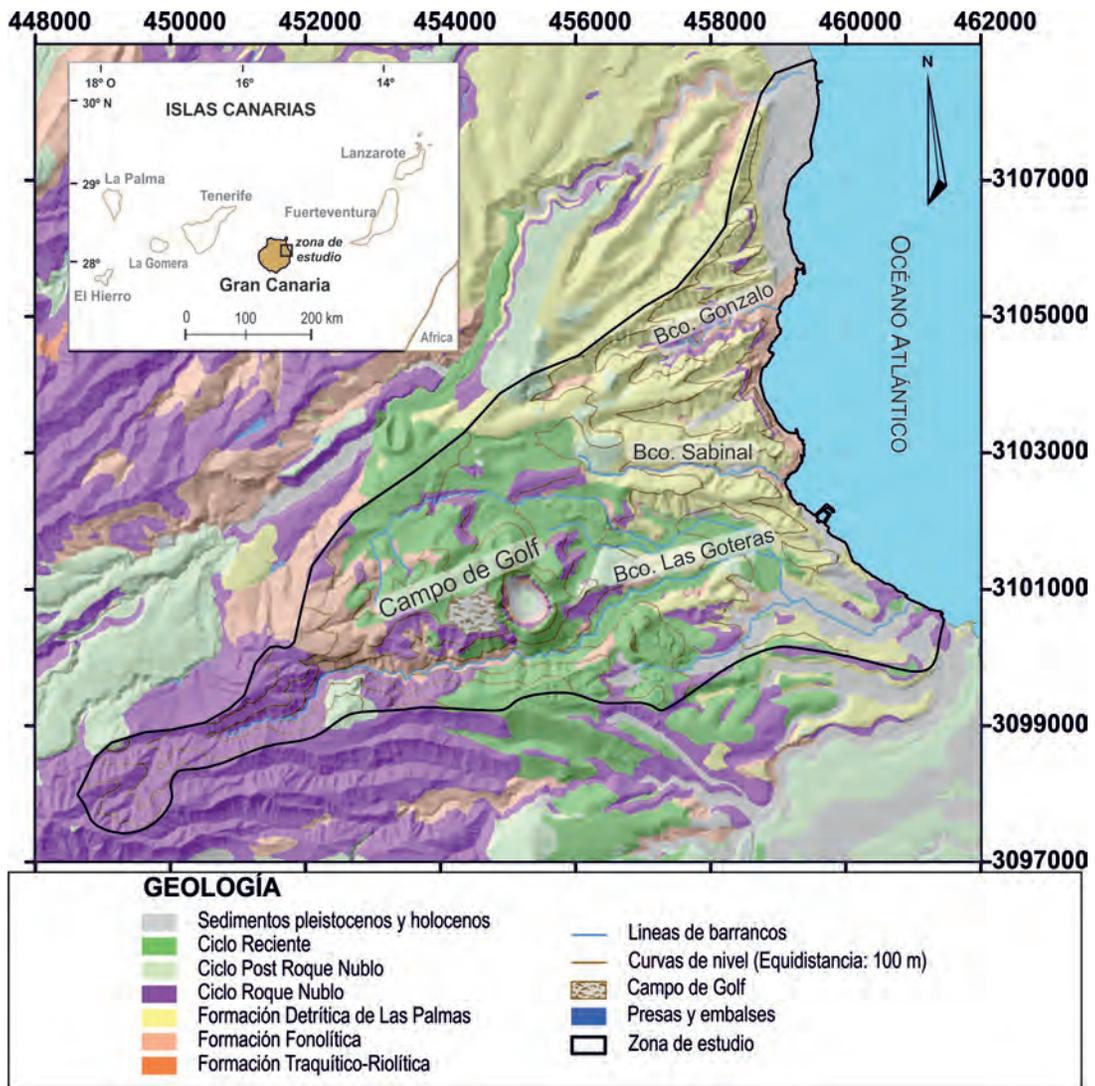
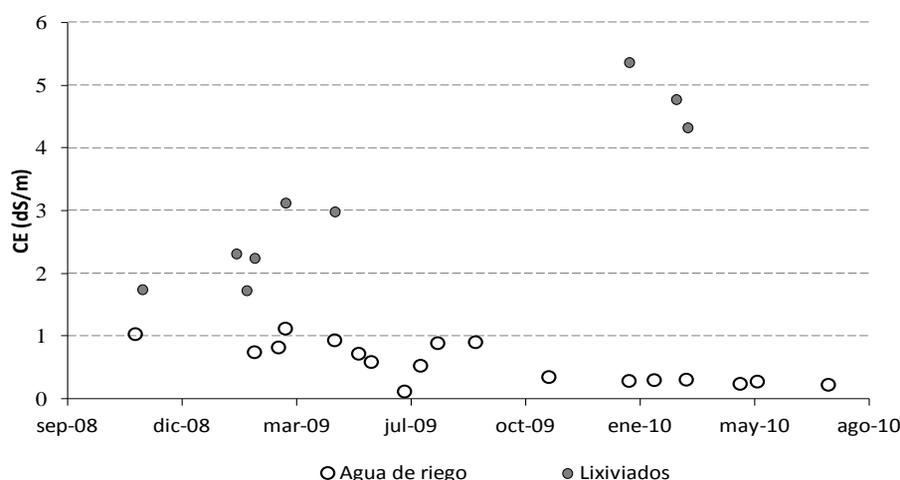


Figura 3; Localización de la zona de estudio, del campo de golf de Bandama y de los tres barrancos principales. Se muestra la geología superficial de la zona (modificada de Balcells et al., 1990).

### 3.1. El agua de riego

El campo de golf se riega desde 1976 con agua depurada en la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) de Las Palmas de Gran Canaria. Para llevar a cabo este estudio, se recopiló información a partir de informes de riego desde 1989 hasta la actualidad. A partir del análisis de los resultados recopilados y obtenidos se pudo estudiar la evolución temporal de la calidad del agua de riego del campo de golf. Entre 1989 y 2002, el agua regenerada presentaba una conductividad eléctrica media de 2800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . A partir del 2002, tras la instalación en la EDAR de un sistema de tratamiento terciario de desalación por ósmosis inversa, se produjo un salto cualitativo en la mejora de la calidad del agua (CIAGC 1999). Desde enero de 2008 hasta agosto del 2009, el agua de riego alcanza valores de conductividad eléctrica que oscilan alrededor de los 900  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . A partir de los muestreos llevados a cabo desde noviembre de 2009, se observó que la salinidad descendió hasta alcanzar una media de 300  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y una composición química diferente (Figura 4).



**Figura 4;** Evolución de la conductividad eléctrica (CE) de las muestras de agua de riego y de los lixiviados del suelo durante el periodo 2008-2010. (Modificado de Estévez et al, 2011).

### 3.2. Lixiviado del suelo

Los lixiviados en el primer metro de suelo, se muestrearon utilizando lisímetros de succión pasiva (Decagon Devices, Inc.) instalados en dos calles del campo de golf en febrero del 2010. Presentan en general mayor concentración de sales respecto al agua de riego debido al lavado de iones. Paradójicamente, a partir del cambio en la calidad del agua de riego, la salinidad del agua lixiviada en el lisímetro se incrementa en mayor medida (Figura 4). A partir de enero del 2010, con agua de riego de menor salinidad respecto al periodo anterior, la concentración de K disminuyó un orden de magnitud, la concentración de sulfato se redujo hasta la mitad, y las de Ca y Mg se mantuvieron constantes. En el lixiviado, el valor de K y  $\text{SO}_4$  se

duplicó y el de Ca y Mg se triplicó a partir de dicha fecha. Este hecho puede ser consecuencia de una desestabilización de los agregados del suelo (Estévez et al, 2011).

### **3.3. Caracterización litológica y análisis del suelo**

El campo de golf se emplaza sobre lavas y piroclastos basálticos con 2000 años de antigüedad, emitidos en las erupciones datadas más recientes de la isla (Balcells et al. 1990, Hansen y Moreno 2008). Estas erupciones cubrieron de cenizas más de 50 km<sup>2</sup> y dieron lugar al Pico y a la Caldera de Bandama (Figura 4). Esta última, con 900 m de diámetro y 250 m de profundidad, se formó a partir de una erupción altamente explosiva originada por la interacción entre la cámara magmática y las aguas subterráneas. Los materiales emitidos se situaron sobre materiales basálticos del Grupo Roque Nublo con 4 M.a. (in situ y deslizados) y fonolíticos más antiguos (8-13 Ma). Intercalados entre estos últimos y aflorando en el interior de la Caldera existen conglomerados aluviales, que pueden ser correlacionados con el Miembro inferior de la Formación Detrítica de Las Palmas (Figura 3).

Los suelos del campo de golf (in situ) se han desarrollado sobre piroclastos basálticos que forman capas de diferente grado de alteración y carbonatación. Los suelos de superficie están poco alterados, muestran un grado de carbonatación variable y presentan una textura franco-arenosa. Pueden clasificarse como Andosoles vítricos. Varios muestreos (01/2008, 03/2009, 11/2009 y 11/2010) del horizonte superficial del suelo (primeros 15 cm) en algunas calles y roughs del campo de golf, han permitido diferenciar la existencia de varias calles con un suelo in situ (franco-arenoso) y otras calles cubiertas con un suelo transportado desde cotas superiores de la misma vertiente de la isla, con naturaleza limo-arcillosa.

El análisis químico de las muestras tomadas ha demostrado una tendencia a mayores valores de Materia Orgánica (MO) y P en el suelo transportado (hasta 180 mg/kg) que en el suelo in situ (hasta 120 mg/kg), lo que refleja una mayor capacidad de adsorción del suelo más arcilloso (transportado). La variación en la calidad del agua de riego a partir de agosto del 2009 dio lugar a un cambio en la composición química del suelo, produciendo una disminución de los contenidos de B y de la salinidad del suelo. Este último parámetro también se ve afectado por la variación estacional, con una disminución que coincide con el final del periodo húmedo (marzo del 2009), lo que pone de manifiesto la importancia de las fechas seleccionadas para programar los muestreos en este tipo de estudios (Estévez et al. 2011)

Al comparar el suelo de la calle con el del rough que la rodea, se observó una gran variación en la mayoría de los parámetros. Los factores que lo explican tienen que ver tanto con la influencia del cambio en la calidad y cantidad de agua, como con el efecto estacional de la época del muestreo. Esta variabilidad es inferior en las calles, lo que confirma un manejo del riego menos cuidadoso en el rough (Estévez et al, 2011).

#### 4. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA E HIDROGEOQUÍMICA DE LA ZONA DE ESTUDIO

La información hidrogeológica previa incluye un inventario exhaustivo de 56 puntos de agua llevado a cabo en 1997 (CIAGC 1997). Dentro de los trabajos del Programa CONSOLIDER-TRAGUA, se actualizó esta información en 2009 mediante un inventario de puntos de agua que permitió obtener medidas del nivel piezométrico, tomar muestras de agua y entrevistar a los propietarios de 16 captaciones. A partir de estos datos, se implantó una red de muestreo trimestral desde enero de 2009 hasta septiembre de 2011, que incluyó 8 captaciones de agua subterránea (Tabla 2 y Figura 5) y el agua de riego del campo de golf.

##### 4.1. Caracterización hidrogeológica

El análisis de los datos tomados ha permitido caracterizar un sistema acuífero en el que se están explotando fundamentalmente materiales fonolíticos por medio de pozos de diferentes profundidades. La tabla 2 resume las características constructivas e indica las formaciones geológicas explotadas en los puntos de agua incluidos en la red de control.

**Tabla 2;** Relación de los puntos de agua de la red de control (Estévez et al. 2010).

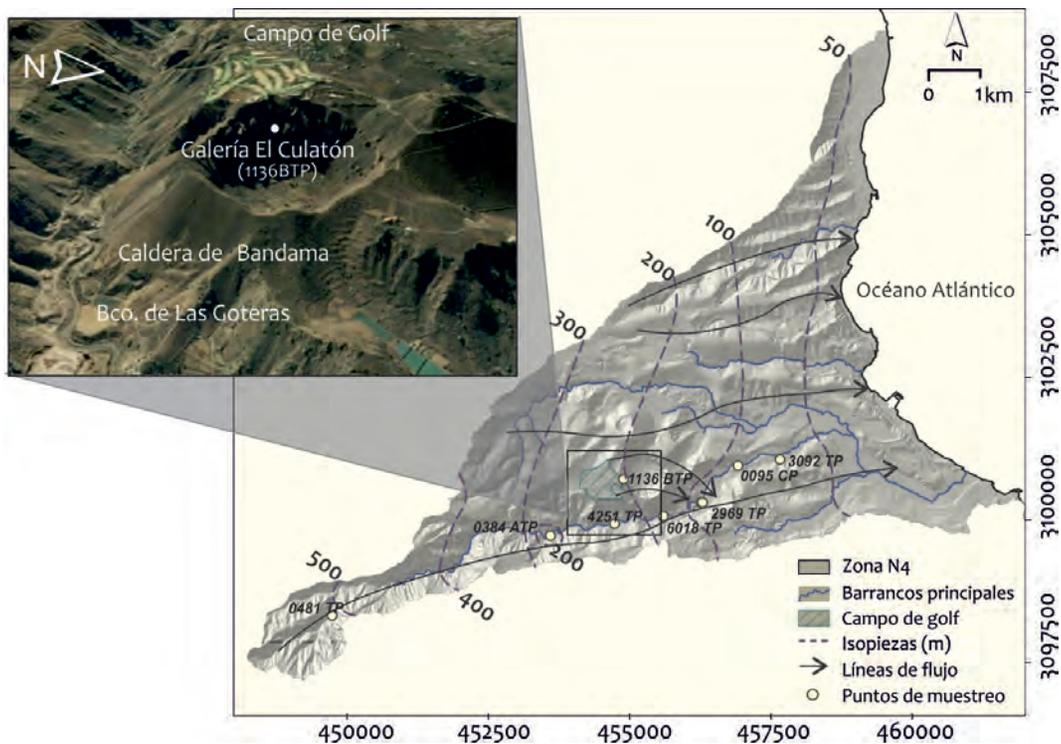
Nº del pozo	Cota (m)	Prof. (m)	Cota fondo (m)	Fm explotada	Tipo de agua	CE del agua ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
0481 TP	712	207,6	504,4	Roque Nublo	$\text{HCO}_3\text{-Na}$	<500
0384 ATP	301	132,8	168,2	Fonolitas	$\text{Cl-HCO}_3\text{-Na}$	1500 -1700
4251 TP	275	70	205	Fonolitas	$\text{Cl-SO}_4\text{-Na}$	1400 -1800
6018 TP	214	31,5	182,5	Basaltos Recientes	$\text{Cl-Na}$	2300 -2600
2969 TP	185	158	27	Basaltos Recientes- Fonolitas	$\text{HCO}_3\text{-Na}$	2800 -3100
0095 CP	153	96	57	Basaltos Recientes- Fonolitas	$\text{Cl-Na}$	2900
3092 TP	110	34,2	75,8	Fonolitas	$\text{Cl-Na}$	3300 - 3600
Galería (1136BTP)	452	~40	452	Roque Nublo des- lizado	$\text{Cl-Na}$	1600 - 1900

Los pozos responden al esquema tradicional, con 3 m de diámetro y galerías horizontales y catas en algunos casos, construidos mediante excavaciones a mano o con explosivos. Los caudales diarios medios equivalentes extraídos en los pozos son en general menores a 1 L/s. Los niveles del agua se han mantenido constantes en todos los pozos, excepto en el pozo 4251 TP, que extrae el agua de galerías secundarias poco profundas.

La galería El Culatón (1136BTP), con 40 m de longitud, parece a unos 60 m bajo el campo de golf (Figura 5), a favor de una fractura desarrollada en sentido SO-NE, en el torrente

denominado El Culatón (Hansen y Moreno 2008). Representa un nivel colgado desarrollado en el contacto entre dos unidades de materiales deslizados del Grupo Roque Nublo, ubicado a 400 m, por encima del nivel freático insular. Estas zonas de contacto se caracterizan por la presencia de material arcilloso triturado que constituyen unidades de despegue producidas durante el deslizamiento en bloques diferenciados de la brecha Roque Nublo. Según los aforos llevados a cabo trimestralmente durante la red control el caudal que mana de la galería es constante y oscila alrededor de 0,05 L/s.

La tentativa de piezometría realizada a partir de los datos obtenidos en el inventario del 2009 (Figura 5) muestra que el flujo responde al modelo general de la isla, siguiendo la dirección OSO-ENE, de cumbre a costa y que el nivel piezométrico general se sitúa a 250 m bajo el campo de golf. Sin embargo, estos pozos tienen profundidades diferentes, por lo que los niveles medidos en los mismos deben ser tomados con precaución. Se distinguió la existencia de un flujo de agua subterránea desde el campo de golf hacia dicho barranco y una zona de explotación preferente en el Barranco de Las Goteras, como atestigua la gran cantidad de pozos que hay en su fondo.



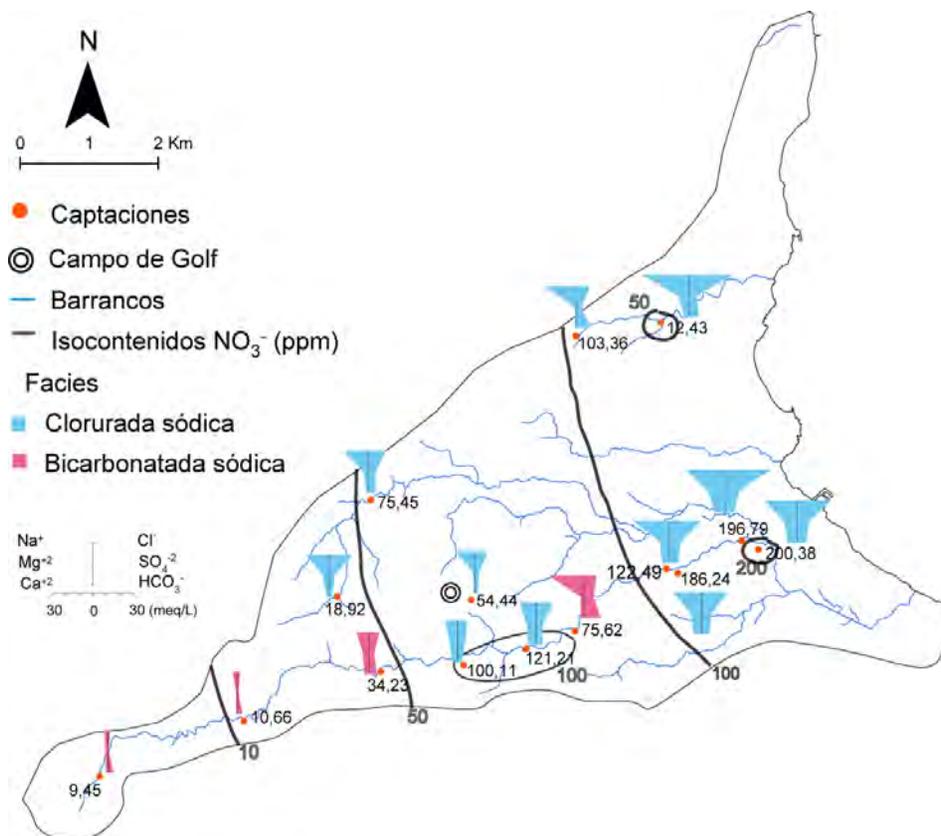
**Figura 5;** Situación de los puntos seleccionados para la red de control de agua subterránea y piezometría tentativa de la zona de estudio según los datos del inventario de 2009. Izquierda: imagen 3D tomada del Google Earth con la situación de la galería El Culatón (punto 1136 BTP de la red de control), el campo de golf de Bandama, la Caldera de Bandama y el barranco de Las Goteras. Modificado de Cabrera et al. 2009b.

#### **4.2. Caracterización hidrogeoquímica**

La hidrogeoquímica del agua subterránea responde al modelo insular, de forma que la salinidad del agua aumenta de cumbre a costa, paralelamente con el tiempo de residencia del agua en el acuífero y el aporte de aguas de recarga cada vez más salinas según aumenta la cercanía al mar. La Figura 6 muestra los diagramas de Stiff modificados de los puntos inventariados en 2009 y el mapa de isocontenidos en nitrato medidos en la misma campaña. Se observa que en la cumbre las aguas son bicarbonatadas sódicas y menos mineralizadas y que hacia la costa aumenta la salinidad y pasan a ser cloruradas sódicas, siguiendo el esquema hidrogeoquímico establecido para la isla (SPA-15 1975). El pozo 2969TP presenta un agua bicarbonatada sódica con mayor salinidad que el resto, pH medio de 5,7 y temperatura de 25°C, por lo que se puede inferir un aporte de CO<sub>2</sub> endógeno. Durante la red control llevada a cabo en la zona (2009-2011), se pudo deducir que las facies descritas no se ven significativamente modificadas en el tiempo. En ambos periodos la separación entre isolíneas en la región central de la zona de estudio induce a intuir procesos de dilución alrededor del campo de golf, siguiendo las líneas de flujo (Cabrera et al. 2009).

La concentración de nitratos en las aguas subterráneas del curso medio-bajo del barranco de Las Goteras (Figura 6) alcanza concentraciones de 200 mg/L, superando por tanto los umbrales establecidos para dicho compuesto (50 mg/L) según la normativa actual (Directiva CEE 676/91, de 19 de diciembre). Este hecho queda patente en la designación como Zona Vulnerable a la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura, descrita en el Decreto del Gobierno de Canarias 49/2000, de 10 de abril (B.O.C. nº 48, de 19.4.00). Varios factores que podrían explicar esta elevada concentración de nitratos son la existencia de fosas sépticas en el curso alto del barranco (CIAGC 2009), el abono excesivo en cultivos localizados a lo largo del barranco y las insuficiencias en la red de saneamiento, con fugas puntuales durante los últimos años.

La comparación entre la química de la galería El Culatón (situada junto al campo de golf) y la de los pozos situados en el barranco (Figura 6), permite deducir que se trata de dos tipos de agua diferente. De la galería mana un agua clorurada sódica con un claro exceso de Na y un contenido superior en Na+K y Cl y menor en Ca, Mg, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub> y NO<sub>3</sub>, mientras que el agua subterránea en el barranco muestra un aumento progresivo en salinidad según disminuye la cota dentro de un mismo patrón. Así, se puede concluir que la galería puede ser considerada un punto de muestreo del agua mezcla entre el agua que abandona el suelo en el campo de golf y el agua que circula por niveles colgados del acuífero insular desde cotas más altas.



**Figura 6;** Diagramas de Stiff modificados para los pozos inventariados en enero de 2009 y mapa de isocontenidos en nitrato medidos en la misma campaña. Los valores consignados en cada punto son mg/L de nitratos (Estévez at al. 2012).

## 5. LOS CONTAMINANTES EMERGENTES

### 5.1. Introducción

En los últimos años, el desarrollo de nuevos métodos analíticos con mayor sensibilidad, ha permitido alertar de la presencia en el medio ambiente de contaminantes de preocupación emergente (Contaminants of Emerging Concern, según la USEPA). Esta preocupación se refiere al desconocimiento del riesgo que su presencia pueda suponer (en la salud humana y el medio ambiente), de las frecuencias en las que se encuentran, o de las fuentes de contaminación (Daughton 2004). Por todo ello, el estudio de estos compuestos de interés creciente, se ha convertido en una de las líneas de investigación prioritarias de los principales organismos dedicados a la protección de la salud pública y medioambiental, tales como la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Agencia para la Protección del Medio Ambiente (EPA) o la Comisión Europea.

La limitada disponibilidad de métodos para su análisis, y el escaso conocimiento acerca de su presencia e impacto en los distintos compartimentos ambientales explica que no hayan sido regulados. Sin embargo, algunos productos fitosanitarios e Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos, entre otros, ya han sido incluidos en la lista de sustancias prioritarias en aguas superficiales (DIR 2008/105 EC), que determina la concentración máxima admisible ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) de los compuestos listados. Además, los Anexos I y II de la citada Directiva incluyen listas de sustancias sujetas a revisión para su identificación como posibles “sustancias prioritarias” o posibles “sustancias peligrosas prioritarias”. Aunque sin umbrales determinados, en estos Anexos se incluyen compuestos farmacéuticos, compuestos fluorados, aditivos de la gasolina, nuevos pesticidas polares, y retardantes de llama. En cuanto al agua subterránea, la Directiva 2006/118/EC relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro (Directiva Hija) establece un umbral máximo de  $0.1 \mu\text{g L}^{-1}$  para las sustancias activas de los plaguicidas, incluidos los metabolitos y los productos de degradación y reacción que sean pertinentes.

Además del origen agrícola asociado al uso de productos fitosanitarios, las fuentes de contaminación con emergentes, principalmente fármacos o productos para la higiene personal, están relacionadas con efluentes de EDAR y hospitales, con las excretas de los animales o con fugas desde fosas sépticas (Hernando et al. 2006). El uso de medicamentos para el tratamiento de humanos y animales tiene como resultado la aparición de los mismos en las aguas residuales debido a la excreción tanto de los compuestos ingeridos como de sus metabolitos (Halling-Sørensen et al. 1998; Daughton y Ternes 1999).

La introducción de emergentes en el medio ambiente a través de riego con aguas regeneradas es una vía de gran relevancia en las zonas semiáridas donde la reutilización constituye una práctica importante (Kinney et al. 2006).

Dentro de los objetivos del Programa CONSOLIDER-TRAGUA y de forma coordinada con el Laboratorio de Química Analítica de la Universidad de Jaén, se ha llevado a cabo un muestreo trimestral para evaluar la presencia de contaminantes emergentes y sustancias prioritarias (2008/105/CE) en el acuífero en estudio, y en el agua de riego del campo de golf de Bandama, durante la red de control vigente. Los primeros resultados de estos trabajos (desde julio de 2009 a mayo 2010) han sido publicados en Estévez et al. 2012b.

La tabla 3 presenta el listado de compuestos detectados, agrupados en: Fármacos, Pesticidas, Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP), Contaminantes Orgánicos Volátiles (COV) y Retardantes de Llama. Se detectaron sólo el 43% de los 183 contaminantes analizados: 42 farmacéuticos, 20 pesticidas, 12 HAP, 2 COV y 2 retardantes de llama. Los compuestos más frecuentes fueron cafeína, nicotina, clorpirifós etil, fluoreno, fenantreno y pireno.

**Tabla 3;** Listado de contaminantes detectados, divididos en las clases: fármacos, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), pesticidas, contaminantes orgánicos volátiles (COV) y retardantes de llama. \*: Detectado al menos una vez en agua subterránea (AS) a una concentración superior a 0,1  $\mu\text{gL}^{-1}$ , x: detectado al menos una vez en agua regenerada (AR) a una concentración superior a 0,1  $\mu\text{gL}^{-1}$ , **negrita:** detectado siempre en todas las muestras, en  *cursiva:* detectado siempre en AR pero nunca en AS, subrayado: detectado en dos muestreos en AS pero nunca en AR, **sombreado:** sustancias prioritarias en aguas superficiales según la DIR. 2008/105/CE. Modificado de Estévez et al. 2012.

FÁRMACOS Y DROGAS DE ABUSO				PRODUCTOS FITOSANITARIOS	
Acetaminofén	Claritromicina	Ibuprofeno	Oxacilina	4,4'-DDE	Hexaclorobutadieno
<i>Ácido flufenámico</i> <sup>x</sup>	C. benzalconio <sup>*x</sup>	Ketoprofeno	Propranolol	4,4'-DDT	Isoproturón
Ácido mefenámico	Codeína	Lincomicina	<i>Propifenazona</i>	Alfa-Endo-sulfán	Metoxicloro
Antipirina	Danofloxacín	Mebendazol	Sulfadime-toxina	Atrazina	Oxifluorfen
Atenolol	Difenidra-mina	Metadona	Sulfametizol	Clorfenvin-fos	Pentaclorobenceno
Benzoilecgonina	EDDP	Miconazol	Sulfametoxa-zol	<b>Clorpirifós etil *</b>	Procimidona
Bezafibrato	Efedrina	Morfina	Sulfapiridina	<i>Diazinón</i>	Propazina
<b>Cafeína</b>	Eritromicina <sup>x</sup>	<b>Nicotina*</b>	Teobromina <sup>*x</sup>	Diurón	Simazina
Carbamazepina	Estrona	Nifuroxazida <sup>*</sup>	Teofilina <sup>x</sup>	Gamma-HCH	Terbutilazina
Cimetidina	<u>Fenilefrina</u>	Ofloxacina	Trimetoprima	Hexacloro-benceno	<i>Terbutrina</i>
Cis-Diltiazem	Gemfibrozilo				
HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS				R. DE LLA-MA	COV
Acenaftileno	Benzo(b) fluoranteno	Criseno	<b>Fluoreno</b>	TEP	124 TCB
Benzo(a) antra-ceno	Benzo(g,h,i) perileno	Dibenzo(a,h) antraceno	Indeno (1,2,3-d)pireno	TBP	135 TCB
Benzo(a)pireno	Benzo(k) fluoranteno	<b>Fenantreno</b>	<b>Pireno</b>		

Las concentraciones detectadas fueron siempre inferiores de 50  $\text{ng L}^{-1}$ , aunque algunos productos farmacéuticos y el pesticida Clorpirifós etil (Tabla 3), se detectaron ocasionalmente en concentraciones más altas. Esta sustancia prioritaria para aguas superficiales supera el umbral máximo (0.1  $\mu\text{g L}^{-1}$ ) permitido para pesticidas en aguas subterráneas (2006/118/CE).

La mayor presencia de compuestos en el agua regenerada que en el acuífero pueden explicarse por la existencia de procesos de adsorción y degradación, así como la detección muy frecuente de algunos contaminantes en agua regenerada que nunca se detectaron en el agua

subterránea (ácido flufenámico, propifenazona, terbutrina y diazinón). Además, la eritromicina se detectó siempre en el agua regenerada (superando ocasionalmente  $0.1 \mu\text{g L}^{-1}$ ), y solamente una vez en el agua subterránea. Sin embargo, algunos compuestos (fenilefrina, nifuroxazide y miconazol) nunca detectados en el agua regenerada, se detectaron siempre en el agua subterránea. Este hecho y el mismo rango de concentración en los diferentes grupos, independientemente de la procedencia del agua, indicaron la influencia de fuentes alternativas de contaminación (fosas sépticas, prácticas agrícolas y fugas en la red de alcantarillado).

La detección generalizada en el agua subterránea de compuestos de alto potencial de adsorción, y la independencia de la concentración frente al origen y la profundidad de los pozos, apunta a la existencia de fenómenos de flujo preferencial como posible ruta de entrada a través de macroporos del suelo y fisuras de los materiales volcánicos atravesados.

## 6. CONCLUSIONES

El estudio de un caso real de riego con agua regenerada en el campo de golf de Bandama ha demostrado la influencia de los cambios en la calidad y cantidad del agua de riego, el efecto estacional de la época de muestreo y el manejo del riego en la afección de esta práctica al medio (suelo, zona no saturada y acuífero).

En el acuífero de la cuenca de las Goteras se explotan fundamentalmente materiales fonolíticos mediante pozos de diferentes profundidades, cuyos niveles piezométricos y composición química del agua se han mantenido prácticamente estables desde 1997, siguiendo el modelo insular general. El nivel piezométrico general se sitúa a más de 200 m de profundidad por debajo del campo de golf, pero existe una galería de agua a 60 m de la superficie del mismo, que corresponde a un nivel colgado que se mezcla con los lixiviados del campo.

A partir del análisis de contaminantes emergentes y del mapa de isocontenidos en nitratos se ha detectado la influencia de fuentes alternativas de contaminación, además del riego de campos de golf, como son las prácticas agrícolas, el riego con aguas regeneradas en el barranco y las fugas desde fosas sépticas o en la red de alcantarillado. Además no se descarta la existencia de flujos preferenciales a través de fracturas de las principales formaciones explotadas (fonolitas Miocenas y brechas deslizadas), que suponen un proceso importante en el comportamiento hidrogeológico de materiales volcánicos.

La alta frecuencia de detección de varios contaminantes emergentes (caféina, nicotina, clorpirifós etil, fluoreno, fenantreno y pireno) y la alta concentración de determinados compuestos (como el antibiótico eritromicina o el plaguicida clorpirifós etil), ponen de manifiesto la importancia de proseguir con estos trabajos para poder cuantificar el riesgo que supone su ubicua presencia en el agua subterránea, así como el estudio del proceso de eliminación natural de los contaminantes emergentes a través de la zona no saturada. El conocimiento de estas sustancias químicas ayudará a identificar los contaminantes específicos dirigidos a

la investigación y el monitoreo futuro, el origen y las vías de entrada al medio, o las acciones futuras para controlar su presencia o eliminación.

#### **AGRADECIMIENTOS.**

El presente trabajo se enmarca en el Programa CONSOLIDER-TRAGUA (CSD2006-00044) y el proyecto REDESAC (CGL2009-12910-C03-02). Se agradece a los propietarios de los pozos y al Real Club de Golf de Las Palmas. Los análisis han sido realizados en el Laboratorio Fitopatológico y Agroalimentario del Cabildo de Gran Canaria y en el Laboratorio del Grupo de Investigación de Química Analítica de la Universidad de Jaén.

#### **REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA**

- Balcells, R.; Barrera, J.L. y Ruiz, M.T. 1990. Mapa geológico de España a escala 1:25000 (MAGNA). IGME.
- Bravo Cos, R. 2009. Aspectos técnicos, jurídicos y económicos de la tramitación de concesiones de aguas regeneradas. En: XXVII Congreso Nacional de Riegos. Murcia.
- Cabrera, M.C., de Bustamante, I. y Candela, L. 2009a. Los trabajos del proyecto CONSOLIDER-TRAGUA: Estudios de la afección a las aguas subterráneas por la reutilización de aguas regeneradas. En Contaminación y protección de los recursos hídricos, 13-22. AIH-Grupo Argentino.
- Cabrera, M.C.; Palacios, M.P.; Estévez, E.; Cruz, T.; Hernández-Moreno, J.M. y Fernández-Vera, J.R. 2009b. La reutilización de aguas regeneradas para riego de un campo de golf: evolución geoquímica y probable afección a un acuífero volcánico (Islas Canarias). Boletín Geológico y Minero 120(4): 543-552.
- Cabrera, M.C.; de Bustamante, I.; Casas, A.; Candela, L.; Lillo, J.; Palacios, M.P. y Tapias, J.C. 2012. Estudios de reutilización de aguas regeneradas en diversas zonas de España en el marco del Proyecto CONSOLIDER-TRAGUA. Geotemas 13.
- Candela, L.; Fabregat, S.; Josa, A.; Surio, J.; Vigués, N. y Mas, J. 2007. Assessment of soil and groundwater impacts by treated urban wastewater reuse. A case study: Application in a golf course (Girona, Spain). Science of the Total Environment 374: 26-35.
- CIAGC (Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria). 1999. Plan Hidrológico de Gran Canaria. BOC 939, Decreto 82/1999 de junio.
- CIAGC (Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria). 1997. Inventario de puntos de agua, zona N4. Datos internos, sin publicar.
- CIAGC (Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria). 2009. Estudio general de la demarcación Hidrológica de Gran Canaria. <http://www.aguasgrancanaria.com>
- Daughton, C.G. 2004. Non-regulated water contaminants: emerging research. Environ Impact Asses Rev (24): 711-32.
- Daughton, C.G. and Ternes, T.A. 1999. Pharmaceuticals and personal care products in the environment: agents of subtle change? Environ Health Perspect 107 (6):907-38.
- Delgado, S. 2009. Presente y Futuro de la reutilización de aguas en Canarias, Academia de Ciencias e Ingenierías de Lanzarote. En Discursos Discurso leído en el acto de su recepción como Académico Correspondiente en Tenerife de la Academia de Ciencias e Ingenierías de Lanzarote.
- Estévez, E.; Cruz, T.; Benavides, A.; Palacios-Díaz, M. P.; Fernández-Vera, J. R. y Cabrera, M.C. 2010. Caracterización hidrogeológica de Bandama (NE de Gran Canaria) para la identificación de los posibles efectos producidos por la utilización de aguas regeneradas. En Jornadas sobre “El cono-

- cimiento de los recursos hídricos en Canarias cuatro décadas después del proyecto SPA-15”Acto de homenaje póstumo al Ingeniero D. José Sáenz de Oiza. Las Palmas de Gran Canaria.
- Estévez, E.; Fernández-Vera, J. R.; Benavides, A.; Mendoza-Grimón, V.; Fonseca, F.; Cruz T.; Cabrera, M. C., Hernández-Moreno, J.M. y Palacios-Díaz, M. P. 2011. Caracterización y evolución del suelo y el agua de un campo de golf de Gran Canaria regado desde 1976 con aguas regeneradas. En Jornadas ZNS 11. Salamanca.
- Estévez, E.; Palacios, M.P.; Cruz, T.; Benavides, A.; Rodríguez-Díaz, M.D.; Fernández-Vera, J.R.; Molina-Díaz, A.; Robles-Molina, A. y Cabrera, M.C., 2012a. Evaluación de la afección al acuífero del NE de Gran Canaria por el riego con aguas regeneradas en un campo de golf. En: Las aguas subterráneas: desafíos de la gestión para el siglo XXI. Ed. AIH-Grupo Español.
- Estévez, E.; Cabrera, M.C., Molina-Díaz, A.; Robles-Molina, J. and Palacios-Díaz, P. 2012b. Screening of emerging contaminants and priority substances (2008/105/EC) in reclaimed water for irrigation and groundwater in a volcanic aquifer (Gran Canaria, Canary Islands, Spain). *Science of the Total Environment* 433: 538–546.
- Halling-Sørensen, B.; Nors Nielsen, S.; Lanzky, P.; Ingerslev, F.; Holten, H.C. and Jørgesen, S.E. 1998. Occurrence, fate and effects of pharmaceutical substances in the environment. *Chemosphere* 36: 357-393.
- Hansen, A. y Moreno, C. 2008. El Gran Volcán. La Caldera y el Pico de Bandama. Ediciones Consejería de Medio Ambiente y Aguas del Cabildo de Gran Canaria. 360 pp + mapas.
- Hernando, M.D.; Mezcuca, M.; Fernández-Alba, A.R. and Barcelo, D. 2006. Environmental risk assessment of pharmaceutical residues in wastewater effluents, surface waters and sediments. *Talanta* 69: 334–342.
- Jensen, M.E.; Burman, R.D. and Allen, R. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements (Chapter 5). In: *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. 60-74. ASCE Manuals and Reports No 70Am Soc Civil En., New York.
- Jensen, K.; Matsuno, Y.; Van der Hoek, W. y Cairncross, S. 2001. Limitations of irrigation water quality guidelines from a multiple use perspective. *Irrigation and Drainage Systems* 15: 117–128.
- Jiménez, B y Asano, T. 2008. Water reuse: an international survey of current practice issues and needs. International Water Association, Scientific and technical Report, N°20, London. 628pp.
- Kinney, C.A.; Furlong, E.T.; Werner, S.L. and Cahill, J.D. 2006. Presence and distribution of wastewater-derived pharmaceuticals in soil irrigated with reclaimed water. *Environ. Toxicol. Chem.* 25, 317–326.
- Marrero, A. y Palacios, M. P. 1996. Depuración y reutilización de aguas en Gran Canaria. Consorcio Insular de Aprovechamiento de Aguas Depuradas de Gran Canaria, 55 pp.
- MIMAN, 2000. Libro Blanco del Agua. 637 pp.
- Mujeriego, R. 2009. Aspectos socioeconómicos de la reutilización planificada del agua. En: Conferencia Nacional sobre la reutilización del agua, ADECAGUA (Asociación para la Defensa de la Calidad de las Aguas), Madrid.
- Palacios, M.P.; Tejedor, M.T. y Hernández-Moreno, J.M. 2005. Recomendaciones para el riego con aguas depuradas en la Macaronesia, 229-256. PROYECTO AQUAMAC, Técnicas y métodos para la gestión sostenible del agua en la Macaronesia, Ed. ITC y Cabildo de Lanzarote.



# **PARTE 4**

Gestión integral del agua  
e Hidrología forestal



## ESTUDIO DE LA FRECUENCIA Y MAGNITUD DE AVENIDAS TORRENCIALES EN EL P.N. DE LA CALDERA DE TABURIENTE (LA PALMA) MEDIANTE TÉCNICAS DENDROGEOMORFOLÓGICAS

Díez-Herrero, Andrés. Instituto Geológico y Minero de España .  
*andres.diez@igme.es*

Génova Fúster, Mar. Universidad Politécnica de Madrid.  
*mar.genova@upm.es*

Mayer Suárez, Pablo. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.  
*pmayer@dgeo.ulpgc.es*

Ballesteros Cánovas, Juan Antonio. Instituto Geológico y Minero de España .  
*ja.ballesteros@igme.es*

Becerril Carretero, Laura. Instituto Geológico y Minero de España .  
*l.becerril@igme.es*

Rubiales Jiménez, Juan Manuel. Universidad Politécnica de Madrid.  
*jm.rubiales@upm.es*

Gutiérrez Pérez, Ignacio. Ferrovial-Agromán.  
*ignaciogutierrezperez@gmail.com*

Hernández Ruiz, Mario. Instituto Geológico y Minero de España.  
*m.hernandez@igme.es*

Saz Sánchez, Miguel Ángel. Universidad de Zaragoza.  
*masaz@unizar.es*

Bodoque del Pozo, José María. Universidad de Castilla-La Mancha.  
*josemaria.bodoque@uclm.es*

Ruiz Villanueva, Virginia. Instituto Geológico y Minero de España .  
*v.ruiz@igme.es*

**RESUMEN:** La red de drenaje del parque nacional de la Caldera de Taburiente (La Palma, Islas Canarias) está constituida por numerosos torrentes tributarios del barranco de Las Angustias, que presentan frecuentes e intensos eventos de avenidas súbitas. Estas riadas han producido incluso víctimas mortales entre practicantes de senderismo (3 fallecidos en noviembre de 2001) e importantes pérdidas económicas al interferir con los proyectos de repoblación de las riberas con especies autóctonas (superiores a los 700.000 euros en los últimos dos años); aparte de daños puntuales a instalaciones del parque y las sendas más transitadas. Ante la imposibilidad de realizar análisis de peligrosidad con métodos hidrológico-hidráulicos convencionales por no existir estaciones de aforo representativas ni datos pluviométricos con series largas y discriminación temporal adecuada, se ha recurrido a los métodos dendrogeomorfológicos. Para ello, en tres campañas de campo se han caracterizado geomorfológica y florísticamente varios tramos de los barrancos principales, y se ha muestreado y analizado cerca de 60 ejemplares de pino canario ubicados en las proximidades de los cauces. A partir del análi-

sis de la secuencia de anillos y de las heridas de los descortezados producidos por la carga sólida transportada durante las riadas, se ha podido reconstruir el registro reciente (últimos 150 años) de eventos de avenidas súbitas que han sufrido estos barrancos. En paralelo se ha realizado una topografía de detalle de los tramos de barranco que, junto con las alturas de los descortezados, permite tener una primera aproximación hidráulica a la magnitud de dichos eventos (caudales, velocidades, energías...).

## 1. INTRODUCCIÓN

Entre todas las catástrofes y desastres de origen natural, las avenidas e inundaciones son las que producen un mayor número de víctimas, heridos y desplazados, así como pérdidas económicas en bienes materiales e infraestructuras, tanto en el mundo y en España, como en muchas de las islas y terrenos volcánicos en cualquier latitud. Basta recordar, en ese sentido, las consecuencias de las riadas que, en las últimas décadas, han afectado a países como Mozambique, Filipinas, China, Venezuela o Estados Unidos; o a diversas localidades de las Azores e islas Canarias, como Santa Cruz de Tenerife o Las Palmas de Gran Canaria.

En Europa, las grandes inundaciones que tuvieron lugar en el centro del continente durante 2002 supusieron un punto de inflexión en la preocupación de las instituciones europeas sobre este problema, que ha desembocado en la iniciativa de la nueva Directiva Europea. Por lo que respecta a nuestro país, según un estudio realizado en 2004 por el IGME en colaboración con el Consorcio de Compensación de Seguros, ambos dependientes ahora del Ministerio de Economía y Competitividad, las pérdidas económicas directas por inundaciones durante el periodo 1987-2002 ascendieron a casi 12.000 millones de euros, es decir, el equivalente al 0,1 % del PIB. Además de esto, se prevén pérdidas cercanas a los 26.000 millones de euros en los próximos 30 años.

Dentro de las inundaciones, las mayores pérdidas de vidas humanas en nuestro país se producen, no por las lentas crecidas en las grandes cuencas fluviales, sino en las avenidas torrenciales que tienen lugar en pequeñas cuencas montañosas. Los casos de la avenida de Biescas, con 86 víctimas mortales, de Badajoz, con 21, de Yebra y Almoguera, con 11, o las recientes víctimas en las provincias de Málaga y Murcia, hacen bien patente este hecho.

Para el análisis científico de la peligrosidad de inundaciones, clásicamente se han empleado métodos histórico-paleohidrológicos, hidrológico-hidráulicos y geológico-geomorfológicos; o cualquiera de las múltiples combinaciones de ellos. Sin embargo, la aplicación de estas técnicas a las cuencas torrenciales de zonas montañosas plantea enormes incertidumbres científicas por: la disponibilidad de los datos de partida, dada la escasez e incluso ausencia de estaciones meteorológicas y foronómicas; su validez espacio-temporal, teniendo en cuenta su irregular distribución altitudinal (concentradas en núcleos urbanos de zonas bajas) y la discontinuidad temporal de las series; y su representatividad estadística, cuando se disponen de muestras inferiores a la treintena de datos.

En estos casos, para completar el registro sistemático de datos, se suele recurrir a la información histórica y paleohidrológica. No obstante, muchas de las zonas analizadas no disponen

de documentación sobre inundaciones históricas al encontrarse alejadas de los centros administrativos y focos de producción documental; ni de registro de depósitos de inundación, al no disponer de materiales detríticos en el área fuente, o de lugares propicios para su depósito (por las altas velocidades de la dinámica torrencial) o mantenimiento. Por ello, ante la ausencia de datos de partida, se hace muy difícil aplicar análisis estadísticos fiables o modelación hidrometeorológica suficientemente calibrada y validada.

En estas zonas de montaña, por sus condiciones edafo-climáticas y su difícil acceso para roturación, sí que se han conservado importantes masas boscosas. Por ello, lo que sí que es fácil y frecuente localizar en casi todos los cauces torrenciales, es la presencia de vegetación de porte arbóreo, ya sean especies riparias o no, próximas a las orillas. Formaciones vegetales que, en su patrón de distribución y en los ejemplares individuales, se ven afectadas en su crecimiento por la interferencia con las avenidas torrenciales que tienen lugar en estos cauces y sus márgenes.

La Dendrogeomorfología es una joven disciplina científica que, aprovechando fuentes de información registradas en las raíces, troncos y ramas de los árboles y arbustos ubicados en determinadas posiciones geomorfológicas (bancos de orilla, barras longitudinales, llanura de inundación, etc.), permite completar (e incluso suplir) el registro de avenidas torrenciales que han acontecido en esa corriente. Para ello es preciso realizar investigaciones para: la búsqueda de ejemplares con elementos idóneos (raíces expuestas, ramas adventicias, descortezados por impacto...), la selección de especies con crecimiento homogéneo; la realización de muestreos planificados de las secuencias de anillos; el estudio de la anatomía vegetal para buscar los caracteres que denoten eventos de avenida torrencial; la sincronización de las secuencias de anillos para la datación de eventos; la incorporación de estos eventos para la mejora del ajuste de la función de distribución de frecuencias; y la modelación hidráulica del emplazamiento para la estimación de caudales circulantes, y con ello la asignación de unas magnitudes a las frecuencias estimadas. De esta manera se consigue extender, completar o incluso suplir, las series de datos del registro sistemático, mediante el empleo de datos *proxy* que evidencian sucesos físicos, y no artificios estadísticos.

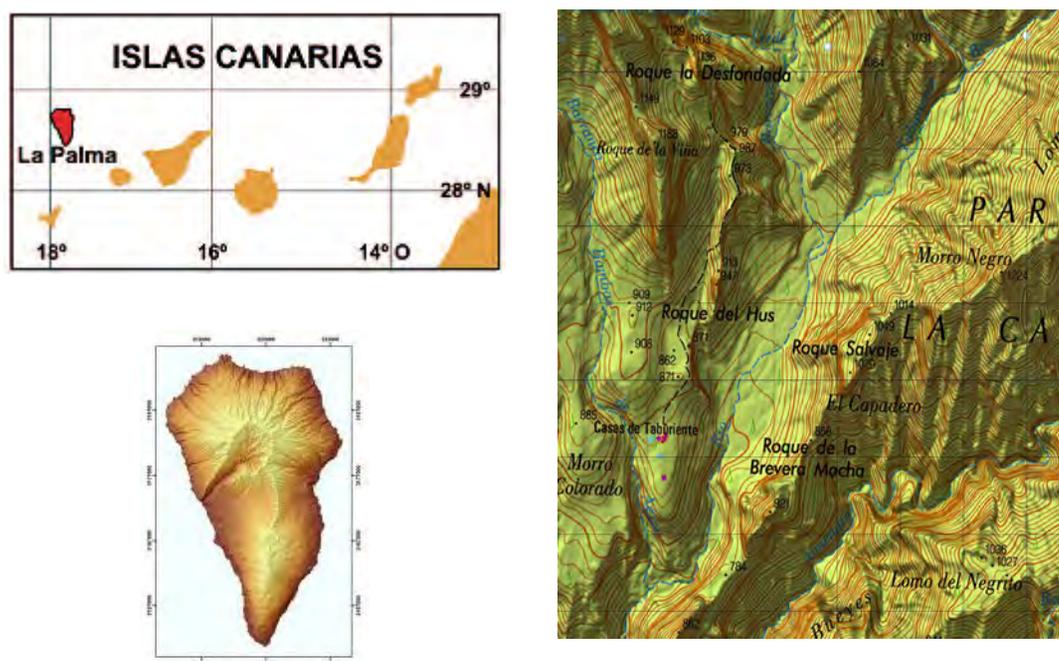
Así pues, la finalidad última de este estudio es investigar sobre la aplicación de fuentes de datos y métodos científicos procedentes del análisis dendrogeomorfológico, a la mejora de las estimaciones de la frecuencia y magnitud de las avenidas torrenciales en algunos de los barrancos del parque nacional de la Caldera de Taburiente (isla de La Palma, Canarias), con vistas a implementar medidas preventivas más adecuadas en la gestión y mitigación de los riesgos asociados.

## **2. ZONA DE ESTUDIO Y PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA**

La Caldera de Taburiente ocupa 4690 ha del sector centro-septentrional de la isla de La Palma (Islas Canarias), y fue declarada parque nacional en el año 1954. Se extiende entre las coordenadas de latitud 28°40' y 28°46' N, y longitud 14°08' y 14°13' O (meridiano de Greenwich); y presenta un rango altitudinal entre los 2426 msnm del Roque de Los Muchachos y los 430 m del fondo del barranco de Las Angustias a su salida del parque nacional. Geoló-

gicamente, a pesar de su nombre, no está formada por una caldera volcánica *s.s.*, sino por diferentes edificios volcánicos superpuestos (Carracedo et al., 2001) desde el complejo basal submarino, inyección de diques, y los estrato-volcanes Taburiente I y II, Cumbre Nueva y Bejenado; entre los cuales existen fases erosivas y grandes deslizamientos, como el de Aridane o la etapa reciente que generó el vaciado del relieve de la propia Caldera. Predominan las litologías basálticas y volcanoclásticas (Vegas, Hernández-Pacheco y Marfil 1999).

La zona concreta donde se ha centrado el análisis es un tramo del fondo aluvial-coluvial del barranco de Taburiente conocida como la 'Playa de Taburiente', desde la confluencia de sus tributarios, los barrancos Verduras de Alfonso y Los Cantos de Turugumay, hasta su paso por las inmediaciones del Centro de Servicios del Parque. La disposición en planta es semejante a la letra Y, con una longitud de 1600 m y una anchura media de unos 130 m (Figura 1). Se trata de una llanura aluvial formada por grandes barras de bloques y gravas entre las que discurren uno o varios hilos de corriente, con una terraza baja separada por un escarpe de banco de orilla de unos 2,3 m de altura media (Figura 2). Las barras estabilizadas y las terrazas presentan vegetación arbórea de pino canario (*Pinus canariensis* Chr. Sm. ex DC.) y sauce canario (*Salix canariensis* C. Sm. ex Link). En esta zona convergen buena parte de los senderos más transitados y se encuentra la única zona de acampada autorizada, estimándose una población expuesta anual media en tránsito por el sistema de barrancos en unas 67.000 personas (A. Palomares, com. per.).



**Figura. 1;** Mapas de situación de la zona de estudio en el marco de las Islas Canarias; la isla de La Palma (imagen: Luis Laín, IGME); y la Playa de Taburiente (IberPix-IGN, sistema de referencia REGCAN95, huso 28, paso de malla 250 m)



**Figura 2;** Vista general de la Playa de Taburiente desde el centro del barranco de Taburiente, hacia la confluencia de los barrancos afluentes (NE).

La red de drenaje del parque nacional de la Caldera de Taburiente (La Palma, Islas Canarias) está constituida por numerosos torrentes tributarios del barranco de Las Angustias, que presentan frecuentes e intensos eventos de avenidas súbitas (Figura 3). Estas riadas han producido incluso víctimas mortales entre practicantes de senderismo (3 fallecidos en noviembre de 2001); varias situaciones de movilización de medios de protección civil al quedar grupos numerosos de visitantes incomunicados por la inundación (la última el 22 de octubre de 2011); e importantes pérdidas económicas al interferir las avenidas con los proyectos de repoblación de las riberas con especies autóctonas y endemismos (superiores a los 700.000 euros en los últimos dos años; Figura 4). A parte de daños puntuales a instalaciones del Parque y fincas (puentes, conducciones de agua, sistemas hidroeléctricos) y las sendas más transitadas.

Por lo anteriormente expuesto, el objetivo concreto de este estudio es realizar un análisis de peligrosidad por avenidas e inundaciones en uno de los sectores más frecuentados del parque nacional (la denominada 'Playa de Taburiente'), como paso previo para la elaboración de estudios del riesgo y la adopción de medidas de gestión del mismo para la prevención de nuevos desastres en el futuro.



**Figura 3;** Vistas del barranco de Taburiente en la Playa de Taburiente durante avenidas torrenciales recientes; izquierda, 24 de diciembre de 2009; derecha, 5 de febrero de 2009. Fotos cedidas por Ezequiel .



**Figura 4;** Afecciones a las repoblaciones de riberas con flora autóctona (sauce canario), tras el evento de avenida torrencial de diciembre de 2010. Fotos cedidas por Ángel Palomares.

### 3. METODOLOGÍA

Se ha establecido una metodología estructurada en 15 actividades o tareas, cuya secuencia de realización y sus relaciones y conexiones se muestran en la Figura 5. Para la realización de las actividades y tareas previstas en el plan de trabajo, se aplicarán de forma simultánea y complementaria enfoques metodológicos de análisis y síntesis, compaginando secuencialmente métodos de adquisición de datos en campo, métodos de estudio en laboratorio, y métodos de tratamiento y análisis en gabinete.

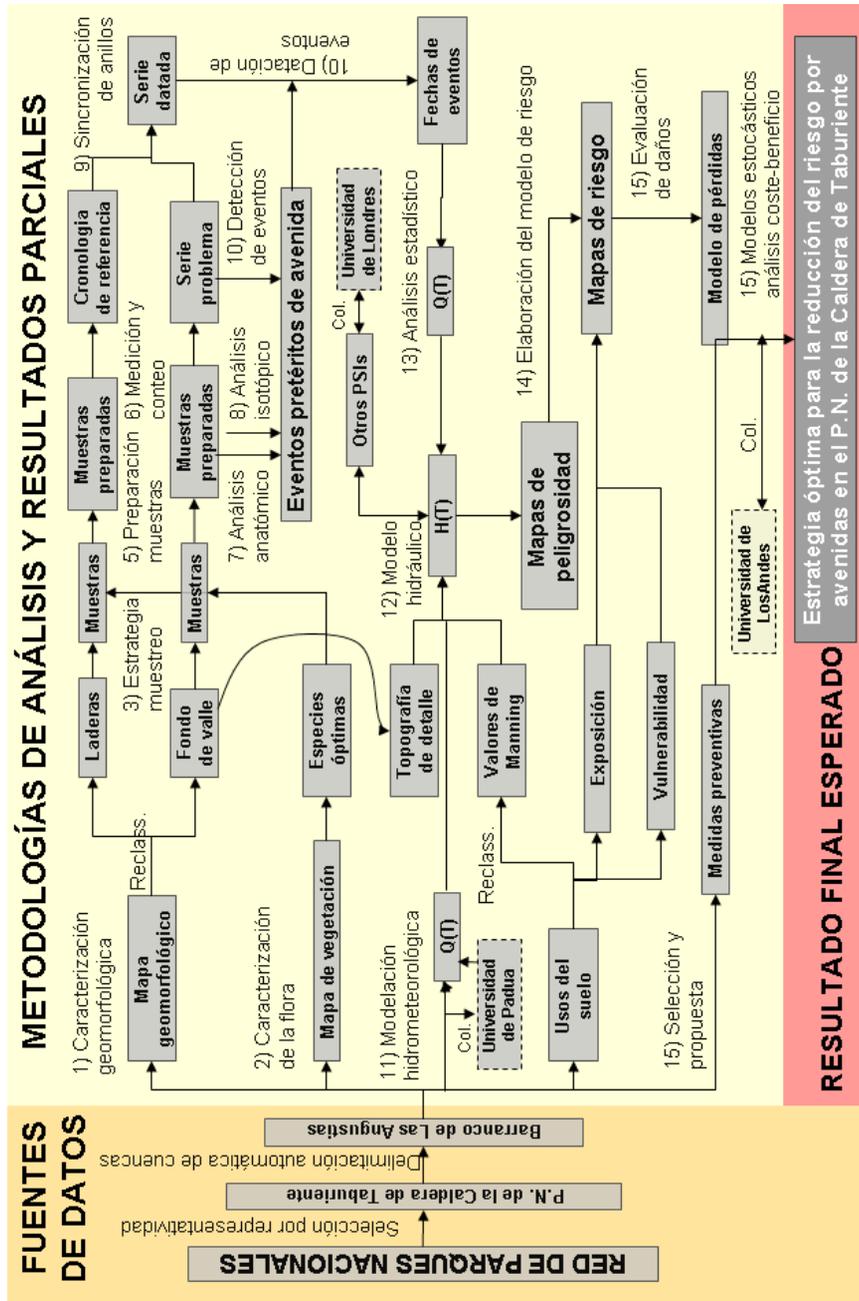


Figura 5; Esquema metodológico general del estudio, desde las fuentes de datos empleadas, las diferentes tareas (15) a realizar y sus conexiones y relaciones, hasta los resultados finales.

Ante la imposibilidad de realizar análisis de peligrosidad con métodos hidrológico-hidráulicos convencionales por no existir estaciones de aforo representativas ni datos pluviométricos con series largas y discriminación temporal adecuada, se ha recurrido a los métodos dendrogeomorfológicos. Para ello, siguiendo la propuesta metodológica de Díez Herrero et al. (2007), se ha comenzado por caracterizar geomorfológica y florísticamente varios tramos de los barrancos principales, combinando tanto fotointerpretación de pares estereoscópicos seriados en el tiempo, como trabajo de campo. A continuación se ha realizado una campaña sistemática de muestreo dendrocronológico de todos los pinos ubicados en el fondo de los barrancos y que presentaban evidencias dendrogeomorfológicas externas atribuibles a la interacción con avenidas torrenciales (descortezados, raíces expuestas, inclinados...; Figura 6).



**Figura 6;** Ejemplar de pino canario muestreado con evidencias dendrogeomorfológicas externas de afección por avenidas, como descortezado y raíces expuestas.

En total se muestrearon más de 60 ejemplares mediante barrena *Pressler*, obteniéndose más de 130 testigos cilíndricos. Para la datación de eventos de avenidas se muestrearon árboles afectados, tanto del tronco completo (en dos direcciones; T-01 a T-48), como de la zona de los descortezados (al menos dos a varias distancias). Sin embargo para la construcción de la serie de referencia se muestrearon árboles sin ninguna afección (T-50 a T-65). También se obtuvieron secciones discoidales (rodajas) y cuñas con motosierra mecánica de tres ejemplares muertos (Figura 7) y un resto de madera subfósil del relleno de la terraza.

Tras su preparación mediante fijación en soporte, secado, cortado y lijado, se han contado y medido los anillos utilizando una mesa *LINTAB* y el software *TSAPWin*. Posteriormente se ha procedido a realizar sincronizado de las series por datación cruzada con la serie de refe-

rencia, y a la identificación y fechado de las perturbaciones de los anillos atribuibles a eventos de avenida pasados.



**Figura 7;** Cuña extraída del lateral de un descortezado donde se observa la cicatriz interna producida por la avenida y tapada por tejido calloso.

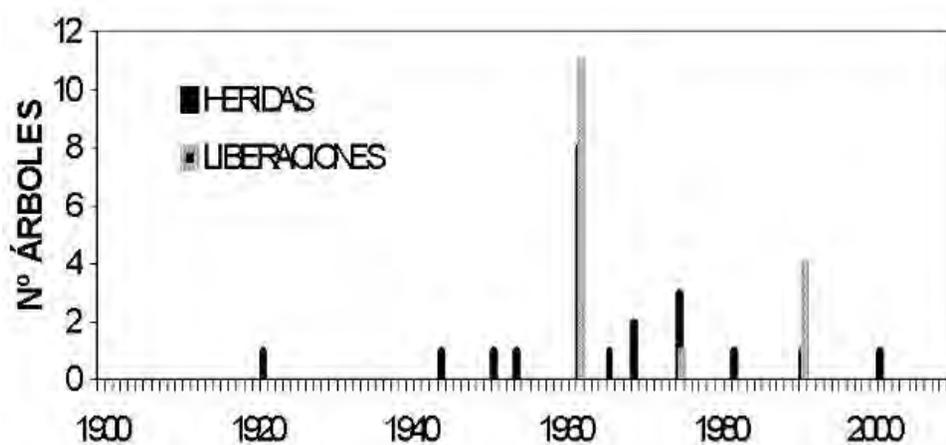
En paralelo se realizó un levantamiento topográfico detallado mediante GPS diferencial y estación total, tanto de los perfiles longitudinales de los barrancos y las líneas de ruptura de pendiente con las laderas y bancos de orilla; como de la posición de todos los árboles muestreados en secciones transversales al cauce, y las cotas de los descortezados.

También se han realizado entrevistas a los escasos habitantes y trabajadores del Parque, consultado las estadísticas meteorológicas, y la documentación histórica de interés (Arroyo, 2009).

#### **4. RESULTADOS PRELIMINARES**

A partir del análisis de la secuencia de anillos y de las heridas de los descortezados producidos por la carga sólida transportada durante las riadas, se ha podido reconstruir el registro reciente (últimos 140 años, desde 1870 a 2010) de eventos de avenidas súbitas que han sufrido estos barrancos.

Existen dos eventos recientes (años 1962-1963 y 1990-1991) que se repiten sistemáticamente en muchos de los ejemplares muestreados (Figura 8), dando una idea de su extremada magnitud y consecuencias. Otras fechas parecen corresponder a avenidas de magnitud media-ordinaria, como: 1976, 1983, 1993 y 2001.



**Figura 8;** Número de árboles que presentan heridas datadas y liberaciones de la anchura de anillos entre los años 1900 y 2011.



**Figura 9;** Detalle del mapa de situación de los perfiles topográficos (líneas rojas) para el modelo hidráulico y los árboles muestreados (puntos verdes).

Existe una buena correspondencia entre estas fechas y las obtenidas de las entrevistas al personal del Parque y los registros meteorológicos (Arroyo, 2009).

La topografía está sirviendo de entrada a la primera aproximación hidráulica de la magnitud de dichos eventos (caudales, velocidades, energías...; Figura 9). Con todas las incertidumbres derivadas de la existencia de lecho móvil y de la necesidad de utilizar escenarios de caudales mínimos alcanzados, los órdenes de magnitud de los caudales obtenidos son coherentes con los correspondientes a una cuenca de estas dimensiones y régimen hídrico.

Con toda esta información se pretende realizar un estudio integral de peligrosidad y riesgo, de utilidad para los gestores del parque nacional a la hora de decidir la ubicación y diseño de infraestructuras (caminos, puentes, vados), la adopción de planes de protección civil, y la selección de rutas de evacuación seguras durante eventos catastróficos.

## 5. CONCLUSIÓN

Los métodos dendrogeomorfológicos se están mostrando como una alternativa y complemento a los métodos hidrológico-hidráulicos tradicionales en lugares donde no existen datos de aforos ni registros de precipitaciones suficientemente fiables estadísticamente. En la Playa de Taburiente están permitiendo reconstruir las fechas de avenidas pasadas e inferir los órdenes de magnitud de los caudales, con lo que se pueden realizar análisis de periodos de retorno útiles en la prevención y gestión del riesgo por inundación.

## AGRADECIMIENTOS

Estos estudios son financiados por el proyecto de investigación IDEA-GesPPNN, del Organismo Autónomo de Parques Nacionales (OAPN 163/2010; Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente). Quisiéramos agradecer su colaboración a todo el personal del Parque Nacional de la Caldera de Taburiente, desde su Director (D. Ángel Palomares), hasta los guías, vigilantes, guardias y obreros de Tragsa. Igualmente al topógrafo Luis Fernández y su ayudante Luis Barca; y al fotógrafo profesional Alberto Carrera.

## REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- Arroyo, J. 2009. *Cinco siglos de la temperie canaria: cronología de efemérides meteorológicas*. Asociación Canaria de Meteorología (ACANMET), 13 pp. (inédito).
- Carracedo, J.C.; Badiola, E.R.; Guillou, H.; Nuez, J. de la; y Pérez Torrados, F.J. 2001. Geology and volcanology of La Palma and El Hierro, Western Canaries. *Estudios Geológicos* 57: 175-253.
- Díez-Herrero, A.; Ballesteros, J.A.; Bodoque, J.M.; Eguíbar, M.A.; Fernández, J.A.; Génova, M.; Laín, L.; Llorente, M.; Rubiales, J.M.; y Stoffel, M. 2007. Mejoras en la estimación de la frecuencia y magnitud de avenidas torrenciales mediante técnicas dendrogeomorfológicas. *Boletín Geológico y Minero* 118 (4): 789-802.
- Vegas, J.; Hernández-Pacheco, A.; y Marfil, R. 1999. Los depósitos volcanoclásticos de la isla de La Palma (Canarias): su relación con la evolución de las Calderas de Taburiente y Cumbre Nueva. *Boletín Geológico y Minero* 110-2: 15-37.



# GESTIÓN SOSTENIBLE DE LAS AGUAS REGENERADAS UTILIZANDO UN SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO SUBTERRÁNEO: CASO DE ESTUDIO PARA LA PRODUCCIÓN DE FORRAJE

Vanesa Mendoza-Grimón. Agronomía. Facultad de Veterinaria. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

*vmendoza@dpat.ulpgc.es*

José Manuel Hernández-Moreno. Departamento de Edafología y Geología. Universidad de La Laguna

Juan Ramón Fernández-Vera. Laboratorio Agroalimentario y Fitopatológico del Cabildo Insular de Gran Canaria.

María del Pino Palacios-Díaz. Agronomía. Facultad de Veterinaria. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

**RESUMEN:** En Canarias el elevado precio de las aguas convencionales y sus fluctuaciones (0,3 a 1 €/m<sup>3</sup>) ha incrementado el abandono de cultivos, lo que supone un riesgo de degradación del suelo. La disponibilidad de recursos alternativos más baratos permitirá diseñar infraestructuras óptimas que posibiliten recuperar las inversiones. Como los sistemas de riego enterrado (SDI) utilizan el suelo como un tratamiento avanzado de aguas, la reutilización de agua regenerada (AR) proporciona un recurso valioso para el riego de forrajes, cuya escasez limita el desarrollo de la actividad ganadera. Se presentan dos casos que utilizan SDI para la producción de Medicago sativa, Sorghum bicolor híbrido y Pennisetum sp., con diferentes calidades de agua: AR en Gran Canaria y agua de pozo en El Hierro. En el primer estudio la salinidad (CE: 2.24dS/m) del AR afectó al suelo, pero los rendimientos de la alfalfa y pasto del Sudán fueron elevados (21000 kg heno/ha·año). Por ello, ocasionalmente hay que utilizar un sistema de riego alternativo para el lavado de sales. En el segundo caso, el rendimiento de la maralfalfa fue de 90000 kg/heno-ha·año. El precio del heno varía entre 0,28-0,36€/kg (Gran Canaria y El Hierro respectivamente). Con precios del agua entre (0,2-0,4€/m<sup>3</sup>) se puede concluir que su coste representa el 20-27% de los ingresos totales. Con las altas dosis de agua utilizadas en la producción de forrajes, el riego con AR es la opción más sostenible para obtener alimentos suficientes para la ganadería y rentabilizar la instalación del sistema de riego, utilizando terrenos abandonados.

## 1. INTRODUCCIÓN

En las islas Canarias la escasez de agua, una de las limitaciones para el desarrollo de la agricultura, está llevando al abandono progresivo de las tierras de cultivo. Este abandono incrementa el riesgo de degradación del suelo, traducéndose en: erosión, pérdida de materia orgánica, compactación, salinización y deslizamientos de tierras (Eckelmann *et al*, 2006). Otra de las consecuencias del abandono de las tierras de cultivo es la escasez de forrajes, teniendo que

importar un elevado volumen de alimentos para la ganadería en Canarias, con las repercusiones tanto económicas como estratégicas que esto conlleva.

En la actualidad el sector agrario tiene que competir por el uso del agua con otros sectores, que suponen mayor contribución al PIB de las islas (como por ejemplo el turismo). La sobreexplotación de los acuíferos ha llevado a una disminución de la calidad del agua. Su escasez produce una fluctuación en el precio de los recursos convencionales (0,3 a 1,0 €/m<sup>3</sup>), que dificulta la recuperación de las inversiones agrícolas. Por ejemplo, el consumo de agua implica desde un 30% para el tomate y un 45% para el plátano (Palacios et al, 2008), a un 20-30% para las forrajeras, del coste total de producción. La disponibilidad de recursos hídricos no convencionales a un precio moderado permitirá diseñar las infraestructuras óptimas adaptadas a las necesidades de los agricultores, permitiendo disminuir el riego en la estimación de la recuperación de las inversiones. Estos recursos alternativos son agua regenerada, agua regenerada y posteriormente desalinizada y agua de mar desalinizada y (AR, ARD y AD).

Los pequeños municipios de las zonas de medianías suelen conducir sus efluentes primarios hasta las EDAR de la costa. Una vez obtenida el agua regenerada, deben bombearla aguas arriba si quieren reutilizarla. Esto supone un alto coste de bombeo (0,08 €/100 m de cota), que incrementa el precio del agua, que ya vale en costa 0,15- 0,35 €/m<sup>3</sup> (según salinidad) y 0,42- 0,5 €/m<sup>3</sup>, para el AR y ARD respectivamente, (Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria, 2004). El precio del otro recurso no convencional, AD, oscila entre 0,5 y 0,6 €/m<sup>3</sup> (Consejería de Aguas Gobierno de Canarias, 2007). Por lo tanto, la reutilización *in situ* de AR producida por plantas depuradoras “baja tecnología” en las propias zonas agrícolas de medianías, puede proporcionar un recurso valioso para estas zonas y eliminar la necesidad del transporte desde la costa (disminuyendo además el consumo de energía).

La producción de forraje es el reuso más sostenible dentro de los posibles citados por el RD 1620/2007 para la utilización del AR, ya que exige un menor tratamiento y entraña un menor riesgo sanitario. Como ya se ha mencionado, en las islas Canarias la falta de forraje fresco es un gran inconveniente para el desarrollo de la actividad ganadera. Canarias importa 2/3 del total consumido (45000 t de forrajes, a los que habría que sumar 34000 t de piensos empleados en la alimentación de rumiantes según el Plan Integral Ganadero del 2010, actualmente en revisión). Esta dependencia exterior supone un problema no sólo económico sino también estratégico para las explotaciones ganaderas, que a menudo sufren problemas con el abastecimiento. Esta baja producción de forrajes en las islas puede estar influenciada por el elevado precio del agua (Palacios et al., 2005).

Cuando se utilizan el AR para el riego de especies forrajeras, hay que tener en cuenta dos consideraciones: los riesgos sanitarios y la sostenibilidad del uso de estos recursos (Jensen et al, 2001.). Regar estas especies a través de un sistema de riego enterrado (SDI), puede ser una alternativa ya que se utiliza el suelo como un “tratamiento natural avanzado del agua”, resultando ser una reutilización más segura y rentable: minimizan los posibles los riesgos sanitarios (Camp, 1998) al evitar el contacto entre el agua y la parte cosechada de la planta,

incrementan la efectividad en el uso del agua (lo que va ligado a la obtención de altos rendimientos en los cultivos) y disminuyen la incidencia de plagas y enfermedades.

Por otra parte, el uso de estos sistemas de riego condiciona la calidad del efluente a emplear. Los sistemas de riego por goteo exigen la ausencia de sólidos en suspensión de gran tamaño. Además, el AR suele tener un pH generalmente más básico (que favorece la formación de precipitados) y materia orgánica biodegradable. El riego con efluentes secundarios exige utilizar filtros de arena y mallas y cumplir con un protocolo de mantenimiento muy exigente. Además, para ser económicamente viables en la producción de cultivos de bajo coste (Rogers y Lamm, 2005), estos sistemas de riego deben tener una vida útil larga que permita recuperar la inversión.

Las AR suelen llevar muchos nutrientes como ejemplo, nitrógeno (N), fósforo (P) y boro (B) que pueden tener un efecto crítico sobre el suelo, los cultivos o el medio ambiente. Por este motivo en los nuevos criterios de calidad del agua, desde el punto de vista de la sostenibilidad, se han propuesto límites de concentración para los riegos a corto y largo plazo (ANZECC, 2000; USEPA 2004). En este sentido, los cultivos forrajeros se caracterizan por su alto nivel de extracciones, lo que limita el riesgo de contaminación por exceso de nutrientes.

El objetivo de este trabajo ha sido evaluar la viabilidad agronómica y económica de la reutilización de las aguas regeneradas en la producción de forrajes utilizando un sistema de riego enterrado, determinando el mejor diseño de riego así como las mejores prácticas de gestión del agua.

## **2. ESTUDIO DE CASOS**

### **2.1. Producción de alfalfa (*Medicago sativa*) e híbrido de pasto del Sudán (*Sorghum bicolor* híbrido) en la isla de Gran Canaria.**

El estudio se llevó a cabo en una parcela experimental de la Granja Agrícola Experimental del Cabildo de Gran Canaria. Sus principales características climáticas son: precipitaciones bajas (243mm/año) y temperaturas suaves (la media anual es de 19,5°C). La parcela se dividió en dos zonas (AR y AD producida por compresión de vapor), para así poder comparar los efectos de estas dos calidades de agua sobre el suelo y en el forraje.

#### **2.1.1. Caracterización de las aguas.**

Cada calidad de agua (AR y AD) disponía de su propio estanque, sistema de filtración (arena y malla) y red de tuberías independientes. La caracterización de las aguas se realizó con criterios químico-agronómicos, presentándose algunos valores en la tabla 1. Una información más detallada de este experimento puede encontrarse en Mendoza-Grimón (2005).

Tabla 1; Composición química de las dos calidades de agua empleadas AR y AD (media y desviación estándar).

Calidad de agua	EC		pH	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
	dS m <sup>-1</sup>						
AD	0.15	(0.14)	7.15 (1.01) 7.76 (0.56)	0.56 (0.91) 14.55 (5.97)	0.20 (0.08) 1.40 (0.46)	0.60 (0.12) 3.86 (1.24)	0.20 (0.19) 4.93 (2.15)
AR	2.24	(0.75)					
	STS		SAR	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub>	Alk	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
	mg·L <sup>-1</sup>		(mmol·L <sup>-1</sup> ) <sup>1/2</sup>	mmolc·L <sup>-1</sup>			
AD	3.03 (3.40)		0.88	0.59(1.12)	0.09(0.12)	1.11(0.98)	0.01(0.01)
AR	17.87 (3.76)		6.94	12.10(5.45)	3.8(0.76)	9.03(2.24)	0.9(1.3)
	NH <sub>4</sub>		Pt	B	Fe	Mn	Zn
	mmolc·L <sup>-1</sup>			μmol·L <sup>-1</sup>			
AD	0.01 (0.01)		ND	ND	0.53 (1.08)	0.14 (0.31)	0.32 (0.31)
AR	0.77 (0.81)		0.14 (0.09)	0.19 (0.06)	7.84 (23.08)	0.7 (1.25)	3.35 (3.83)

STS: sólidos totales en suspensión Pt: fósforo total Alk: alcalinidad ND: bajo limite de detección

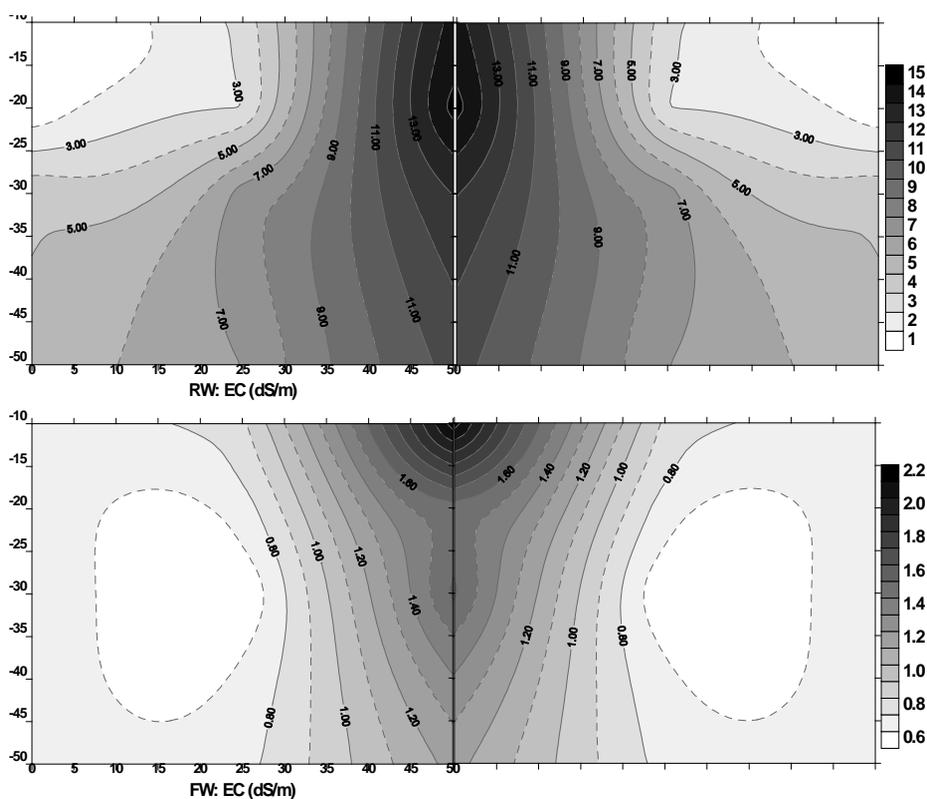
Los contenidos en DBO5 para la calidad de AR fueron aceptables para los sistemas de riego por goteo ( $16 \pm 5$  y  $12 \pm 6$  mg/ L, antes y después de la filtración, respectivamente). Sin embargo en una ocasión estos valores fueron superiores a 150 mg/L (posiblemente por un mal funcionamiento de la EDAR). A pesar de todo ello el sistema de filtrado protegió convenientemente la instalación.

Las AR muestran una limitación en su uso con respecto a los valores de salinidad y B (aunque ambas especies forrajeras presentan alta tolerancia a salinidad) pero no muestran limitación en cuanto a la infiltración (Ayers y Westcot, 1985). Por otro lado, las concentraciones de boro, nitrato y cloruros también presentan limitaciones moderadas para el uso de esta calidad de agua. En relación con la sostenibilidad, el contenido de B (0,19 (mmolc/ L, equivalente a 2,0 mg/L), P (0,14 mmol/L o 4,21 mg/L), y N (1,66 mmol/L1 o 23,27 mg/L), superaron los límites de concentración propuestos para la irrigación a largo plazo de 0,75, 0,05, y 5 mg/L respectivamente (ANZECC, 2000; USEPA 2004), pero fueron aceptables para los criterios a corto plazo (2, 0.8-12 y 25-125 mg/L, respectivamente). El resto de nutrientes y metales para la calidad de agua regenerada son aceptables para el riego a largo plazo.

### 2.1.2. Efectos en el suelo

La textura del suelo era franco-arcillosa (27.6% de arcilla) y originalmente salinos y sódicos (ESP 24%), pudiendo ser clasificados como Anthrosol (FAO, 1998) o Torriarent (Soil Survey Staff, 1998).

Se realizó un muestreo tras 24 meses de riego a 0, 0,25 y 0,5 m de distancia de la línea de goteros y a 4 profundidades: 0,1; 0,2; 0,3 y 0,5 m. Los resultados del CE en el perfil del suelo se muestran en la figura 1. Se observa que la gestión del agua utilizando un SDI influencia el perfil de salinidad en el suelo: los mayores valores de CE se midieron en la superficie y entre las líneas de goteo, superándose el límite de tolerancia de los cultivos.

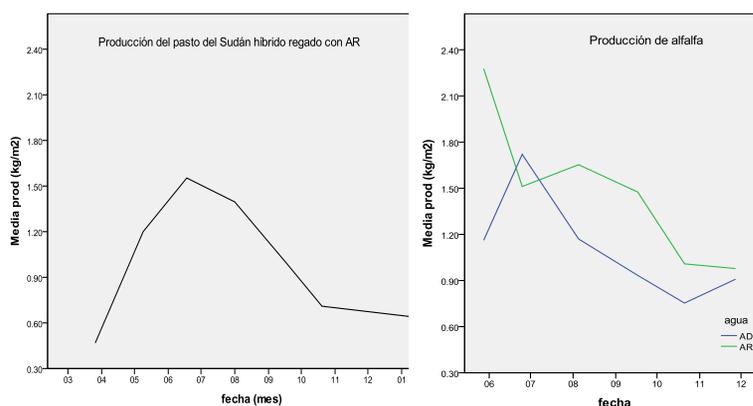


**Figura 1;** Conductividad Eléctrica (CE) del perfil del suelo. Datos XY se obtuvieron a tres distancias diferentes desde el gotero: 0, 0,25 and 0,50 m, y a 4 profundidades: 0,1, 0,2, 0,3 and 0,5 m). Se han representado figuras simétricas para representar todo el perfil de suelo, las líneas de riego están separadas un metro. Siendo RW la calidad de agua regenerada y FW la calidad de agua desalada. El gotero se encuentra a -20 cm de profundidad. Observar que las escañas de CE son diferentes. (Palacios et al., 2009)

### 2.1.3. Producción de forrajes con SDI

Estudios previos han demostrado la viabilidad de los sistemas de riego enterrado (SDI) para la producción de alfalfa (Hutmacher et al, 1992; Mead et al, 1992; Mc Gill y Hutmacher, 1993 y Hutmacher et al, 1996). También se ha podido comprobar la disminución en el consumo de agua bajo estos sistemas cuando se compara con el riego por aspersión en el cultivo sorgo (Colaizzi et al., 2003), y disminuciones de un 25% en la cantidad de agua aplicada (Mendoza-Grimón, 2005).

Lamm (2002) cita que la salinidad puede ser un problema en este sistema de riego. La Figura 2 muestra el rendimiento del cultivo de la alfalfa y el pasto del Sudán durante un periodo tipo. Se observa la mayor producción en la época más cálida y que la mayor diferencia por la calidad de agua se produjo en primavera, coincidiendo con la salinidad más alta obtenida en suelos AR (se superó el umbral para estas especies). En invierno se obtuvo para el pasto del Sudán una producción ligeramente inferior (es una especie C4), mientras que la alfalfa tiene un metabolismo C3.



**Figura2;** rendimiento expresados en kg/m<sup>2</sup>, durante un período tipo, para el pasto del Sudán y la alfalfa regada con las dos calidades de agua

El valor promedio por cosecha de pasto del Sudán y alfalfa regados con AR fue de 1,05 y 1,1 kg de forraje fresco/m<sup>2</sup> respectivamente. Considerando 8 cosechas por año (sin corte de diciembre a febrero), el rendimiento acumulado de un año es de 8,4 kg/m<sup>2</sup> (17 Mg de materia seca/ha). Serra et al., (2005) citan un valor promedio en dos años de 25.5 Mg/ha de materia seca que es superior al obtenido en Gran Canaria, aunque estos autores sólo cosechan 2 veces al año, utilizaron abonos minerales y su dato está obtenido en pequeñas parcelas experimentales.

La distribución de la humedad del suelo obtenida para todos los tratamientos de riego fue suficiente para el eficaz crecimiento vegetal. En nuestro estudio el agua se movía horizontalmente más de 0,6 m de las líneas de goteo y llegó a la superficie del suelo por encima de la línea lateral. De hecho, el rendimiento significativamente más alto se observó en el primer corte, en las líneas de riego que se situaban más próximas (0,5 m en comparación con 1 m) desapareciendo estas diferencias en los siguientes cortes. Estos resultados para la producción de alfalfa son consistentes con los mencionados por Alam et al., (2002) en la región semiárida de Kansas, que llegó a la conclusión de que es más económico utilizar el espaciado de 1 m. Los mismos resultados se obtuvieron para el pasto Sudán. No se observaron diferencias significativas para las distancias de los goteros (0,5 y 0,75 m). Por tanto, recomendamos distancias de separación entre líneas y goteros de 0,75 m.

Aunque las aguas utilizadas contenían sales (CE: 2,24 dS / m) y sodio (SAR: 6,94), el riego con SRE dio lugar a una producción efectiva de forraje (entre 8,4 y 11,9 kg de materia fresca/m<sup>2</sup> durante las 8 ó 9 cosechas del año, lo que equivale aproximadamente a 21000 kg/heno ha y año). Los problemas de salinidad al utilizar el SDI afectaron negativamente a la producción de cultivos, por lo que sería recomendable alquilar ocasionalmente un sistema de riego alternativo para lavar sales.

En la actualidad el precio del heno de forraje en Gran Canaria oscila entre 0,26 y 0,28 € / kg (heno de alfalfa y gramínea respectivamente). Suponiendo un rendimiento anual 21000 kg/heno ha y año, el ingreso bruto oscila entre 5500-5900 €/ ha y año. Y dado que el uso del SDI permite utilizar el AR mas barata (consideramos 0,2 € /m<sup>3</sup>), y que se utilizaron 600L/m<sup>2</sup>, se puede concluir que el coste del AR representa alrededor del 20- 22% de los ingresos totales. Por tanto, es posible cultivar muchos terrenos abandonados en las Islas Canarias regando con AR para obtener forraje suficiente para la producción animal y rentabilizar la instalación del sistema de riego.

## **2.2. Producción de maralfalfa (*Pennisetum sp.*) en la isla de El Hierro con SDI**

El estudio se llevó a cabo en una parcela experimental de la Granja Agrícola Experimental del Cabildo de El Hierro. Sus principales características climáticas son: precipitaciones bajas (271 mm/año) y temperaturas suaves, con una temperatura mínima absoluta (T<sub>m</sub> abs) de 10,4°C y la media de temperaturas mínimas (T<sub>m</sub>) de 11,9°C.

### **2.2.1. Caracterización del agua.**

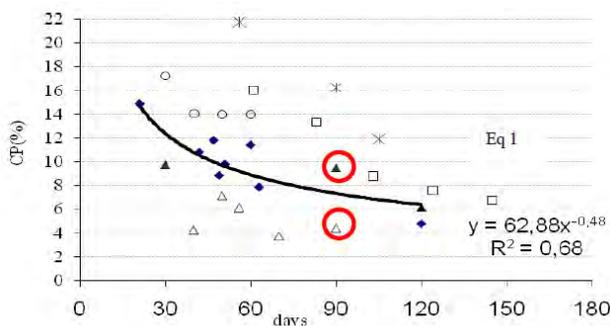
La parcela se regó con agua procedente de pozo, con baja salinidad y sodio, pH ligeramente básico y ausencia de nutrientes.

### **2.2.2. Caracterización de la maralfalfa (*Pennisetum sp.*)**

La maralfalfa (*Pennisetum sp.*) es una gramínea C4 muy productiva pero muy exigente en radiación, agua y nutrientes. Presenta buen valor nutritivo (Márquez et al., 2007) que disminuye con la edad de la planta, por lo que aconsejamos cortarla entre los 45 y 60 días. A esa edad tiene un valor de proteína alrededor del 10%. La temperatura de 10°C provoca la parada de su crecimiento (Cook et al., 2005). Como en invierno estamos próximos a las exigencias mínimas de temperatura para la maralfafa, en Canarias al alejarnos de la costa los rendimientos obtenidos serán inferiores a los citados.

### **2.2.3. Efectos en el suelo**

La textura del suelo era franco-arenosa, con densidad aparente de 0,93, pH 7,2 y CE (1:5) de 0,24 dS/m, pudiendo ser clasificados como andosoles (Soil Survey Staff, 1998) poco evolucionados, con presencia de vidrios volcánicos.



Se realizaron muestreos periódicos del suelo: al principio del experimento, tras la aplicación de un estercolado y aproximadamente cada 3 meses. Una descripción más detallada de este experimento puede encontrarse en Palacios et al, 2012. Pese al estercolado, la maralfalfa agotó el N del suelo tras 6 meses de cultivo, entrando en carencias (figura 3). Hemos calculado que, para obtener elevados rendimientos extrae aproximadamente 1000 kg/N ha y año. Por tanto, si no abonamos el suelo irá progresivamente perdiendo sus reservas de N orgánico y la planta entrará en carencias de este elemento. Pero si no se aporta el N progresivamente, además de desperdiciar el dinero que costó el abono se contaminarán los acuíferos. Respecto a los otros dos macronutrientes, para el máximo rendimiento se extraerían 36 y 48 kg de fósforo y potasio respectivamente por corte, unos 220 y 290 al año.



**Figura 3;** (superior): variación en la concentración de PC según los diferentes días de cosecha. Triángulos: datos de nuestro estudio. También se representan datos de otros estudios: rombos: Carulla. (2004) and Clavero and Razz (2009), estrellas: Correa et al. (2006), cuadrados sin relleno: Vieira et al. (1997) y círculo sin relleno: Kozloski et al., (2003). La ecuación 1: se ha obtenido ajustando los datos de Carulla et al., (2004) y Clavero y Razz. (2009) y los de nuestro estudio (triángulos rellenos), pero excluyendo aquellos en los que se presentaba una deficiencia de N (triángulos sin relleno, del corte de los 50 días). En la parte inferior se presenta un detalle de la parcela de cultivo de maralfalfa sin déficit de N (izquierda y bandeja superior) y con déficit de N (derecha y bandeja inferior), que se corresponden con los valores interiores a los círculos.

#### **2.2.4. Producción de maralfafa**

Las líneas de plantas deben separarse aproximadamente 0.75 m para las condiciones canarias de alta radiación, quedando las plantas separadas unas de otras aproximadamente 0.30 m.

Aunque la eficiencia en el uso del agua de la maralfafa es elevada (con riego enterrado consume aproximadamente 300 L por cada kg de materia seca producida), para obtener altas producciones hay que aportar grandes cantidades de agua, siendo recomendable aplicarla en pequeñas dosis regando dos veces al día. Respecto a las necesidades de riego, en una primera aproximación, recomendamos multiplicar la evapotranspiración (ET) por un valor cercano a 1,5 (coeficiente de consumo) en la época de mayor porte de la planta. Cuando la planta está recién cortada o en épocas con temperaturas próximas a las que paralizan el crecimiento, este coeficiente puede considerarse 1. Con estos supuestos hemos calculado que consume aproximadamente 21000 m<sup>3</sup> para producir 90 t heno (360 t materia fresca) por ha y año.

En la actualidad el precio del heno de forraje en El Hierro oscila entre 0,36 y 0,35 € / kg (heno de alfalfa y gramínea respectivamente). Suponiendo un rendimiento anual 90000 kg/heno ha y año, el ingreso bruto supone alrededor de 31500 €/ ha y año. Considerando el precio del agua a 0,4 € /m<sup>3</sup>, y que se utilizan 2100L/m<sup>2</sup>, se puede concluir que el coste del agua de pozo representa alrededor del 27% de los ingresos totales. Por tanto, sería recomendable utilizar recursos hídricos alternativos para regar el cultivo de maralfafa en la isla de El Hierro y rentabilizar la instalación del sistema de riego.

### **3. CONCLUSIONES**

Con el sistema de riego enterrado, la calidad de agua regenerada, los suelos de las islas y una adecuada elección de las especies, hemos sido capaces de obtener una producción de forraje de calidad, incluso en el invierno. Debido a los altos volúmenes de agua necesarios para la producción de forrajes, el riego con aguas regeneradas es la opción más sostenible para el mantenimiento de la actividad ganadera en Canarias. Por tanto, es posible cultivar muchos terrenos abandonados en las Islas Canarias regando con AR para obtener forraje suficiente para la producción animal y rentabilizar la instalación del sistema de riego.

#### **AGRADECIMIENTOS**

Los autores quieren agradecer la ayuda prestada por la Granja Agrícola Experimental, el Consejo Insular de Aguas del Cabildo de Gran Canaria y el Ministerio de Ciencia y Tecnología para la ayuda financiera. Así como, a la Agencia Canaria de Investigación que ha financiado el proyecto: “Fomento de la producción forrajera sostenible en la isla de El Hierro” (SolSubC200801000012) la SCL Ganaderos de El Hierro, su Cabildo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alam, M.; Trooien, T. P.; Dumler, T. J. and Roger, D. H. 2002 Using Subsurface Drip Irrigation for Alfalfa. *Journal of the American Water Resources Association*. Vol.38, (6): 1-7.
- ANZECC y ARMCANZ, 2000. Australian guidelines for water quality monitoring and reporting. National Water Quality Management Strategy Paper No 7, Australian and New Zealand. Environment and Conservation Council & Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand, Canberra.
- Ayers R.S y Westcot D.W, 1985. Water quality for agriculture. Irrigation and Drainage Paper 29, 1st revision, Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome.
- Camp C.R. 1998. Subsurface drip irrigation: A Review. *Transaction of ASAE*: VOL. 41 (5): 1353-1367.
- Carulla, J.E.; Cárdenas, E.; Sánchez, N y Riveros, R. 2004. Valor nutricional de los forrajes más usados en los sistemas de producción lechera especializada de la zona andina colombiana; En: *Eventos y Asesorías Agropecuarias EU* (editores), Seminario Nacional de Lechería Especializada: "Bases Nutricionales y su Impacto en la Productividad". Medellín, septiembre 1 y 2: 21 – 38.
- Clavero, T. and Razz, R. 2009. Valor nutritivo del pasto maralfalfa (*Pennisetum purpureum* x *Pennisetum glaucum*) en condiciones de defoliación. *Rev. Fac. Agron.* vol.26. no.1. p.78-87. ISSN 0378-7818.
- Colaizzi, P.D.; Barnes, E.M.; Clarke, T.R.; Haberland, J.H.; Choi, C.Y. and Waller, P.M. 2003. Water Stress Detection under High Frequency Sprinkler Irrigation with water deficit index. *ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 129(1): 36-44.
- Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria. 2004. Boletín Oficial de la Provincia de Las Palmas 26 marzo 2004: 4280-4282
- Consejería de Aguas Gobierno de Canarias (2007). El agua en Canarias (Water in Canary Islands) <http://www.gobcan.es/citv/dga/aguacanarias.html>
- Cook, B.G.; Pengelly, S.D.; Brown, J.L.; Donnelly, D.A.; Eagles, M.A.; Franco, J.; Hanson, B.F.; Mullen, I.J.; Partridge, M.; Peters, R.; and Schultze-Kraft. 2005. Tropical Forages: an interactive selection tool., [CD-ROM], CSIRO, DPIandF(Qld), CIAT and ILRI, Brisbane, Australia. pical East Africa. Part 3. Rotterdam, available at: <http://www.tropicalforages.info/>; accessed September, 2010.
- Correa, H.J. 2006. Calidad nutricional del pasto maralfalfa (*Pennisetum sp*) cosechado a dos edades de rebrote. *Livestock Research for Rural Development*. 18(6)
- Eckelmann, W.; Baritz, R.; Bialousz, S.; Bielek, P.; Carre, F.; Houšková, B.; Jones, R.J.A.; Kibblewhite, M.G.; Kozak, J.; Le Bas, C.; Tóth, G.; Tóth, T.; Várallyay, G.; Yli Halla, M. and Zupan, M. 2006. Common Criteria for Risk Area Identification according to Soil Threats. *European Soil Bureau Research Report No.20*, EUR 22185 EN, 94pp. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg
- Jensen, K., Matsuno, Y., van der Hoek, W. y Cairncross, S. 2001. Limitations of irrigation water quality guidelines from a multiple use perspective. *Irrigation and Drainage Systems* 15: 117–128, 2001.
- FAO 1998. World Reference Base for Soil Resources Reports, vol. 84. FAO Roma pp21– 22.
- Hutmacher, R.B.; Phene, C.J.; Mead, R.M.; Clark, D.; Shouse, P.; Vail, S.S.; Swain, R.; van Genuchten, M.; Donovan, T. and Jobes, J. 1992. Subsurface drip irrigation of alfalfa in the Imperial Valley. *Proceedings, 22nd California/Arizona alfalfa Symposium*, University of CA and University of AZ Cooperative extension, Holtville, CA, December 9-10, 22:20-32.
- Hutmacher, R.B.; Mead, R.M. and Shouse, P. 1996. Subsurface Drip: Improving Alfalfa Irrigation in the West. *Irrigation Journal*, 46(1): 48-52.

- Jensen, K.; Matsuno, Y.; van der Hoek, W. and Cairncross, S. 2001. Limitations of irrigation water quality guidelines from a multiple use perspective. *Irrigation and Drainage Systems* 15: 117–128
- Kozloski, G.V. J.; Perotoni, M.L.S.; Ciocca, J.B.T.; Rocha, A.G.; Raiser, L.M.B. and Sanchez. 2003. Potential nutritional assessment of dwarf elephant grass (*Pennisetum purpureum* Schum. cv. Mott) by chemical composition, digestion and net portal flux of oxygen in cattle *Animal Feed Science and Technology* 104(1-4) 29-40
- Lamm, R. 2002. Advances and disadvantages of subsurface drip irrigation.” International meeting of advances in drip/Irrigation”. Puerto de La Cruz, Canary Islands. December 2-5
- Márquez, F. J.; Sánchez, D.; Urbano, C. and Dávila. 2007. Evaluación de la frecuencia de corte y tipos de fertilización sobre tres genotipos de pasto elefante (*Pennisetum purpureum*). 1. Rendimiento y contenido de proteína. *Zootecnia Trop.* 25(4) 253-259.
- McGill, S. and Hutmacher, R.B. 1993. Buried Drip for Alfalfa? *The Furrow* 98(7):26-27, November-December.
- Mead, R.M.; Hutmacher, R.B. and Phene, C.J. 1992. Subsurface drip irrigation of alfalfa. Proceedings, CIT/USDA-ARS Seminar on Subsurface Drip Irrigation: Theory, Practice and Application, Harris Ranch C. CA Oct 22 , pp. 177-178.
- Mendoza-Grimón, V. 2005. Reutilización de aguas depuradas para el riego localizado de especies forrajeras: el ciclo del fósforo en el medio ambiente rural. Disertación de tesis de doctorado. Dept. de Patología y Producción Animal, Univ de Las Palmas de GC.
- Palacios, M.P.; Mendoza-Grimon, V.; Fernandez, J.R.; Del-Nero, E.; Tejedor, M.; Lupiola, P.; Rodriguez, E.; Pita, L. and Rodriguez, F. 2005 Reclaimed water management in mountain areas of semiarid regions for safe animal production (to feed animals and to irrigate forage crops). EAAP publication *Animal Production and natural resources utilization in the Mediterranean mountain areas*. Vol No 155 (183-189).
- Palacios, M.P.; Mendoza-Grimón, V.; Fernández, F.; Fernandez-Vera, J.R and Hernandez-Moreno, J.M, 2008. Sustainable Reclaimed Water Management by Subsurface Drip Irrigation System: a study case for forage production *Water Practice & Technology* vol3 issue2
- Palacios-Díaz, M.P.; Mendoza-Grimón, V.; Fernández-Vera, J.R; Rodríguez, F; Tejedor-Junco, M.T and Hernández-Moreno, J.M. 2009. Subsurface drip irrigation and reclaimed water quality effects on phosphorus and salinity distribution and forage production. *Agricultural Water Management* 96: 1659-1666. ISSN: 0378-3774.
- Palacios, M.P.; Mendoza-Grimón, V.; Fernández, J.R and Hernández-Moreno, J.M.2012. Effects of Defoliation and Nitrogen uptake on Forage Nutritive Values of *Pennisetum* sp. De próxima publicación
- Plan Ganadero de Canarias. 2010. Gobierno de Canarias. En revisión.
- REAL DECRETO 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.
- Rogers, D.H. and Lamm, F.R. 2005. Key considerations for a successful subsurface drip irrigation (SDI) system. In proceedings of the Central Plains Irrigation Conference, Sterling, CO, Feb. 16-17. Available from CPIA, 760 N. Thompson, Colby, KS. Pp 113-118.
- Serra, J.; Salvia, J. and Solsona, M.S. 2005. Producción y valor nutritivo de variedades comerciales de sorgo forrajero y de híbridos de sorgo × pasto del sudán normales y “Brown Midrib, en el nordeste de Cataluña. Yield and nutritive value of Sorghum and Sudan grass hybrids. In: *Producciones agroganaderas: Gestión eficiente y conservación del medio natural (Vol II)* pp:505-512XLV Reunión Científica de la SEEP (Sesión Prod. Vegetal) (available in <http://www.seepastos.es/Asturias> 2005)
- Soil Survey Staff. 1998. Keys to Soil Taxonomy, 8th ed. USDA-NRCS, Lincoln.

USEPA. 2004: "Guidelines for wastewater reuse". US Environmental Protection Agency. EPA/625/R-04/108. Washington, DC.

Vieira, R.A.M.; Pererira, J.C.; Malafaia, P.A.M. y De Queiros, A.C. 1997. The influence of elephan-grass (*Pennisetum purpureum* Schum., Mineiro variety) growth on the nutrient Kinetics in the rumen. *Animal Feed Science Technology* 67 151-161.

## LA FRECUENCIA Y EVOLUCIÓN DEL MAR DE NUBES DURANTE EL VERANO EN LAS CUMBRES DE TENERIFE Y LOS VALLES DE LA OROTAVA Y DE GÜÍMAR

Marzol Jaén, María Victoria. Departamento de Geografía, Universidad de La Laguna.  
*mmarzol@ull.es*

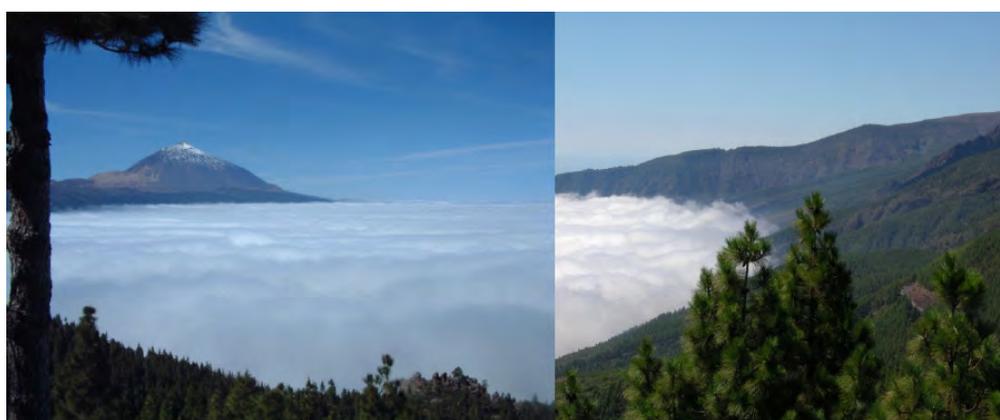
**RESUMEN:** La observación detallada del mar de nubes desde la torre contraincendios de El Gaitero, situada en la línea de cumbres de la isla de Tenerife, a 1.747 m.s.n.m., permite establecer cuál es el comportamiento de esa nubosidad durante el período estival, desde mediados de junio hasta mediados de octubre. El período de análisis abarca desde 1998 hasta 2012. En este artículo se establece la frecuencia horaria y las características que ese tipo de nubosidad estratiforme tiene en la cimera del sector central de la isla así como su estancamiento en los valles de La Orotava y de Güímar. Los resultados indican que hay importantes diferencias tanto a lo largo del día como entre los cinco meses estudiados. Así, el mar de nubes es más frecuente en las cumbres desde las 18 h hasta las 9 de la mañana que durante el mediodía y, además, es más persistente en los primeros meses del otoño que en los últimos del verano. En lo que se refiere a su presencia y estancamiento en los valles de ambas vertientes es mucho más habitual en el de La Orotava que en el de Güímar, sobre todo durante el mes de julio.

### 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los rasgos más característicos del clima del archipiélago canario es la estructura anómala que presenta su atmósfera en las capas más bajas y, como consecuencia de ello, la existencia de una nubosidad estratocumiliforme —mar de nubes— que, en función de la altitud de cada una de las islas, queda detenida en las vertientes expuestas a los vientos alisios húmedos. La estructura anómala atmosférica es consecuencia de una inversión térmica entre los 700 y 1.500 metros de altura. Su dinámica estacional ha sido estudiada (Dorta, 1996) y se conocen las importantes variaciones altitudinales que tiene entre el verano, más baja y de mayor potencia, y la primavera y el invierno, cuando está a mayor altura y es de menor espesor.

La nubosidad resultante queda restringida a la capa subyacente de dicha inversión y tiene un desarrollo exclusivamente horizontal porque la inversión le impide hacerlo en la vertical. Este hecho hace que las gotas que componen esas nubes no tengan posibilidad de aumentar de tamaño y peso, siendo mucho más pequeñas y con menor contenido líquido que las que conforman las nubes que producen precipitaciones. Ahora bien, en su contacto con las islas, habitualmente en las medianías septentrionales de cada una de ellas, depositan sus gotitas en las hojas de los árboles y arbustos, proporcionando así considerables cantidades de agua al subsuelo (Marzol, 2008).

El estudio de los rasgos que caracterizan a ese mar de nubes, en lo que se refiere a la situación atmosférica que lo origina, a su frecuencia y distribución, tanto temporal como espacial, y a la altitud y espesor que puede alcanzar, presenta importantes problemas metodológicos (Marzol et al., 2001). No ocurre lo mismo con el análisis de la cantidad de agua que puede llegar a depositar y que convierte a este tipo de nubosidad en un recurso hídrico de inestimable valor en numerosos lugares desérticos del mundo que reúnen semejantes condiciones climáticas a las de Canarias (Schemenauer and Joe, 1989; Schemenauer and Cereceda, 1991; Cereceda and Schemenauer, 1996; Schemenauer, 1992; Semenzato et al., 1998; Sabino, 2001; Prada and Silva, 1998; Marzol et al., 1996; Aboal et al., 2000; Marzol and Sánchez Megía, 2008; Marzol et al., 2010; Klemm, et al., 2012).



**Ilustración 1;** Mar de nubes cubriendo los valles de La Orotava, vertiente Norte, y Güímar, vertiente Sur. (© Marzol, M<sup>a</sup> V. 2012)

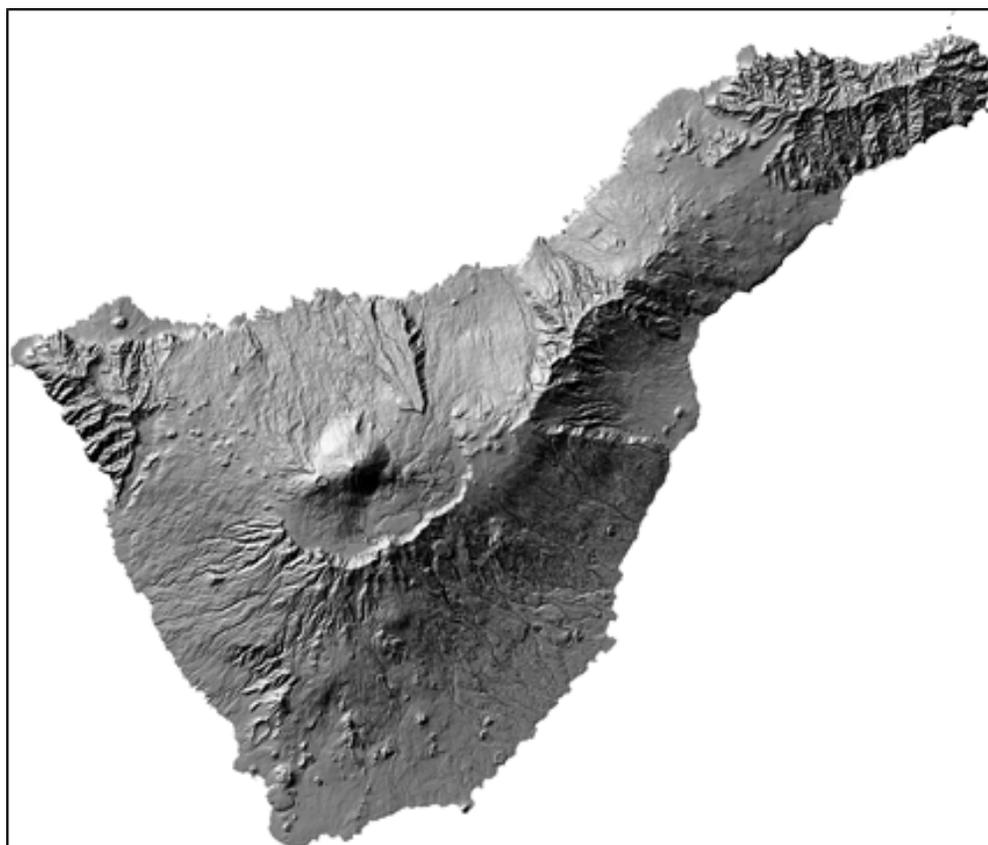
## 2. OBJETIVO Y METODOLOGÍA

El objetivo de este artículo es mostrar la evolución que ha tenido el mar de nubes en verano en los últimos quince años en Tenerife, con el fin de detectar si hay o no alguna tendencia en su frecuencia, tanto temporal como espacial. Ese objetivo se concreta espacialmente en tres áreas: las cumbres del sector central de la isla y los valles de La Orotava, en la vertiente septentrional, y de Güímar, en la meridional.

Para ello se elige El Gaitero, lugar situado en la línea divisoria de la isla, a 1.747 m.s.m., abierto a los vientos húmedos del Norte y desde donde se divisa muy bien la presencia de mar de nubes en ambos valles insulares (ilustración 1). El Gaitero es el punto culminante de las fuertes pendientes que tienen ambas vertientes en el sector central de Tenerife y que finalizan en la dorsal de Pedro Gil. Es un área cubierta por un bosque de pinar (*Pinus canariensis*) que se beneficia de precipitaciones anuales alrededor de los 750 mm y soporta los fuertes contrastes térmicos diarios y anuales (Marzol et al., 1988; Luis et al., 1994). La vertiente orientada al Norte, en su último tramo, posee un sotobosque abierto de brezos (*Erica arborea*) y codesos

(*Adenocarpus foliosus*) que indica que ese lugar está sometido con cierta frecuencia al ambiente húmedo proporcionado por el mar de nubes. A pesar de esta certeza, la elevada altitud (1.747 m.s.n.m.) y la topografía de cumbres, hacen que este sector culminar de Tenerife no reúna las condiciones geográficas más favorables para obtener una eficaz captación de agua de la nubosidad estratiforme (Cereceda et al., 1988; Marzol, 2003), sobre todo durante el verano puesto que la inversión térmica constriñe al mar de nubes a altitudes mucho más bajas de los valles de La Orotava y de Güímar.

El período de análisis es de 1998 a 1912, desde mediados de junio hasta mediados de octubre, coincidiendo con el tiempo que permanecen abiertas las torres forestales para la campaña estival contraincendios que gestiona el Cabildo Insular de Tenerife. La colaboración del personal de la torre contraincendios de El Gaitero, al igual que el de la torre de Cruz de Gala en el NW de la isla, tiene un valor inestimable. En el caso que nos ocupa, el registro detallado que han realizado de la frecuencia del mar de nubes en la cumbre y en ambos valles, La Orotava y Güímar, permite conocer cuál ha sido la evolución de ese elemento climático en los últimos quince años.



**Figura 1;** Áreas de estudio y localización de El Gaitero, a 1.747 m.s.n.m., Tenerife.

Para ello, se han computado las horas en las que el mar de nubes cubre la torre de El Gaitero, es decir alcanza la cumbre de Pedro Gil, y es factible que la niebla deposite agua en ese lugar. En un estudio realizado en 1998 se comprobó que la falta de instrumental específico que midiese la frecuencia de la nubosidad se podía suplir con la observación y que el método resultaba válido (Marzol et al., 1988; Valladares, 1996; Marzol et al., 2001.; Marzol, 2003). Para ello, se comparó, durante un período de seis meses y a escala horaria, la información obtenida de la observación desde la torre y la del número de horas con humedad relativa superior al 95% registrado en un termohigrógrafo, dando como resultado una diferencia de tan sólo el 1,3% a favor de la observación. Con anterioridad se había comprobado que a esa humedad ambiental las gotas de la niebla se depositaban en las acículas de los pinos.

En segundo lugar, se ha contabilizado la presencia del mar de nubes en los valles de La Orotava y de Güímar a cuatro horas del día, a las 7, 14, 18 y 22 horas, con el fin de conocer cuál es su frecuencia de estancamiento durante el verano en ambas vertientes y cuál ha sido su evolución desde el año 2001 hasta la actualidad.

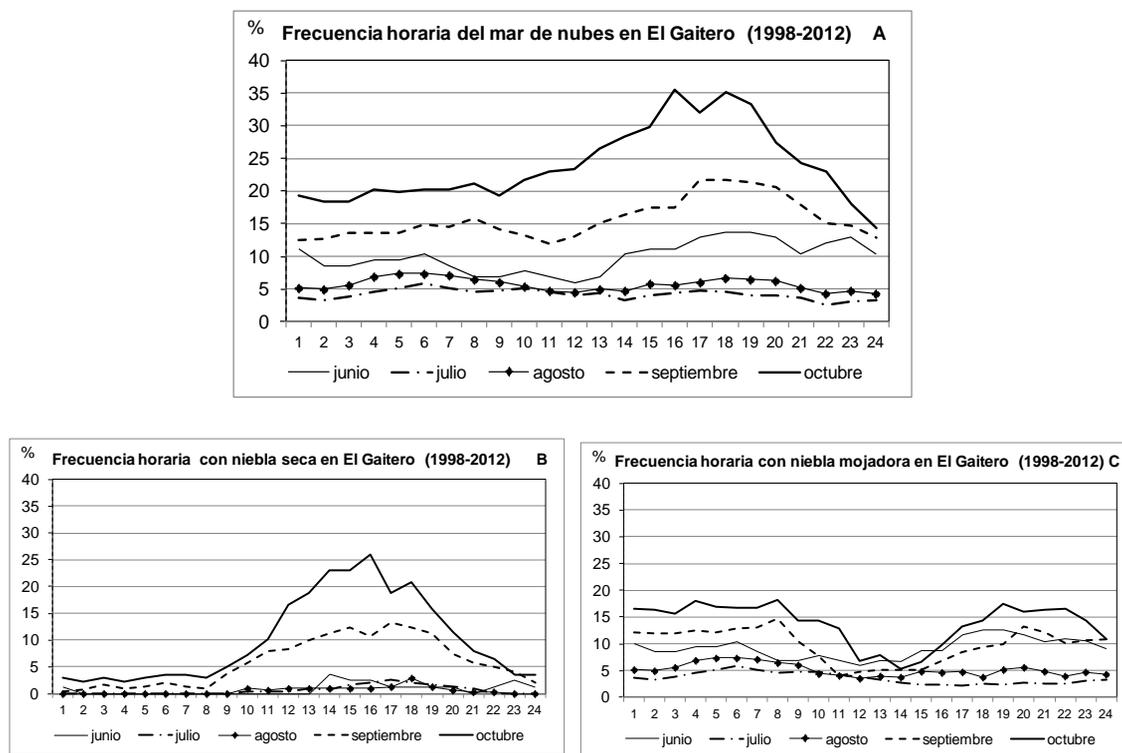
### **3. RESULTADOS**

#### **3.1. Características del mar de nubes en las cumbres**

La nubosidad estival que supera los 1.700 metros de la dorsal de Tenerife fundamentalmente es la del mar de nubes en el 94,3% de las ocasiones (Marzol et al., 2001). Sin embargo, tiene una frecuencia muy baja si se compara con la que afecta en esos meses a las cimas de los macizos de Teno y Anaga, situados a menor altitud y en ambos extremos de la isla. El 8% de las horas del día están cubiertas por nubes frente al 60% y 81% respectivamente (Marzol et al., 2010). Esa baja frecuencia es todavía menor durante los dos meses centrales del verano, julio y agosto, con tan sólo el 4%, y algo más elevada en los de septiembre y octubre con el 12%; en junio se da una situación intermedia puesto que las nubes llegan hasta los 2.000 metros con una frecuencia del 9%.

Un segundo rasgo que se conoce del mar de nubes en ese lugar es su variación interhoraria. Su análisis muestra que hay dos modelos de comportamiento horario de la nubosidad en las cumbres puesto que en julio y agosto la niebla se presenta de forma similar a lo largo de todas las horas del día mientras que en los dos meses del otoño, septiembre y octubre, y en menor medida en junio, hay una clara diferencia horaria con un máximo al atardecer, entre las 16 y 20 horas, y un mínimo durante las horas nocturnas y hasta las 9 de la mañana (figura 2).

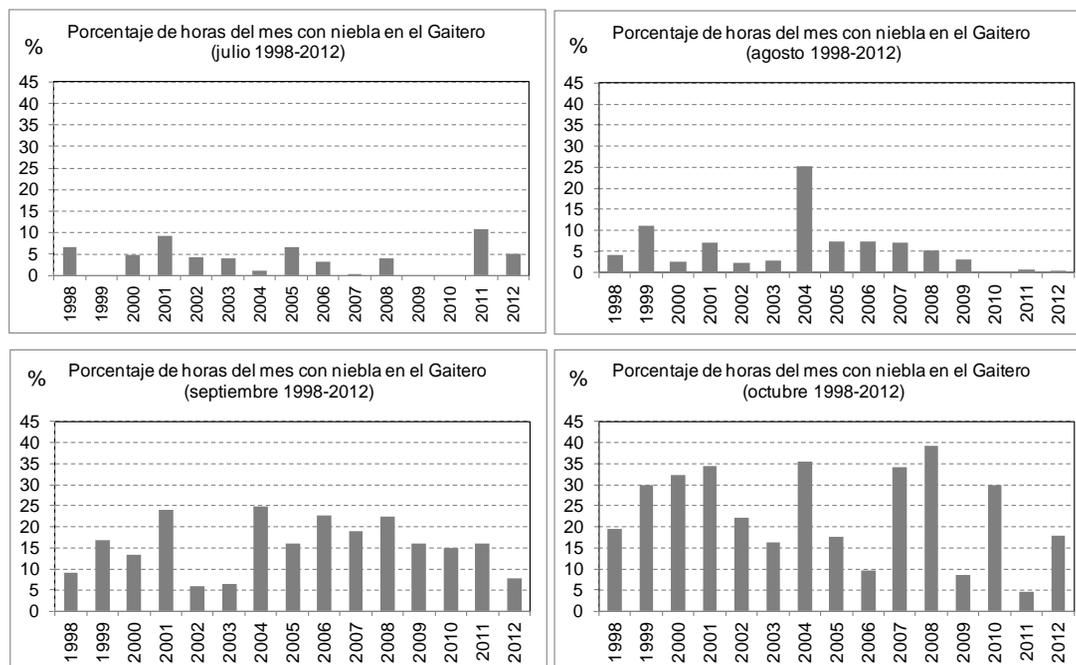
De la información obtenida de las horas en las que el mar de nubes “toca” la cumbre de El Gaitero se puede extraer, además, cuándo no proporciona agua al entrar en contacto con la vegetación, por lo que se le denomina niebla seca, y cuándo se puede obtener agua de ella por lo que se le conoce como niebla mojadora. Al total de horas con mar de nubes (figura 2A) se restan las horas con niebla seca (figura 2B), y a partir de la diferencia entre ambas se conoce la frecuencia de la niebla mojadora (figura 2C).



**Figura 2;** Frecuencia horaria en la que el mar de nubes alcanza las cumbres de Tenerife durante el verano (A), en la que la niebla es seca y no proporciona agua (B) y porcentaje de horas en las que la niebla deposita agua en el bosque de pinar (C).

De este modo, se puede afirmar que un porcentaje muy alto de la niebla que alcanza El Gaitero durante junio, julio y agosto deja agua aunque su frecuencia de aparición es muy baja – inferior al 10% de las horas- mientras que en los meses de septiembre y octubre es habitual que la niebla, sobre todo la que llega hasta las cumbres durante las horas del mediodía, se trate de una niebla seca que no aporta agua. Como resultado de ello, queda patente un tercer rasgo de la niebla, en este caso *mojadora*, en ese lugar y es que su mayor frecuencia se invierte, siendo más habitual desde las 18 horas hasta las 9 de la mañana, reduciéndose notablemente al mediodía (figura 2C).

Al analizar la evolución anual del tiempo en el que las cumbres de Tenerife han estado cubiertas por el mar de nubes en los últimos quince años, no se observa tendencia alguna. Sí es cierto que el comportamiento medio de cada uno de los meses oculta años en los que la nubosidad fue mucho más frecuente de lo habitual, por ejemplo agosto de 2004 que contabilizó el 25% de las horas de ese mes, o por el contrario muy escasa, caso de octubre de 2009 y 2011 que sólo tuvieron el 9% y 5% respectivamente de las horas con niebla (figura 3).



**Figura 3;** Porcentaje de horas en cada uno de los meses en los que las cumbres de la dorsal de Tenerife han estado cubiertas por el mar de nubes (1998-2012)

### 3.2. Características del mar de nubes en los valles

El estudio de la frecuencia del mar de nubes estancado en los valles de La Orotava y de Güímar durante el verano se realiza a cuatro horas concretas del día (7, 14, 18 y 22 horas) que representan lo que ocurre al amanecer, mediodía, atardecer y anochecer. Los resultados obtenidos indican que:

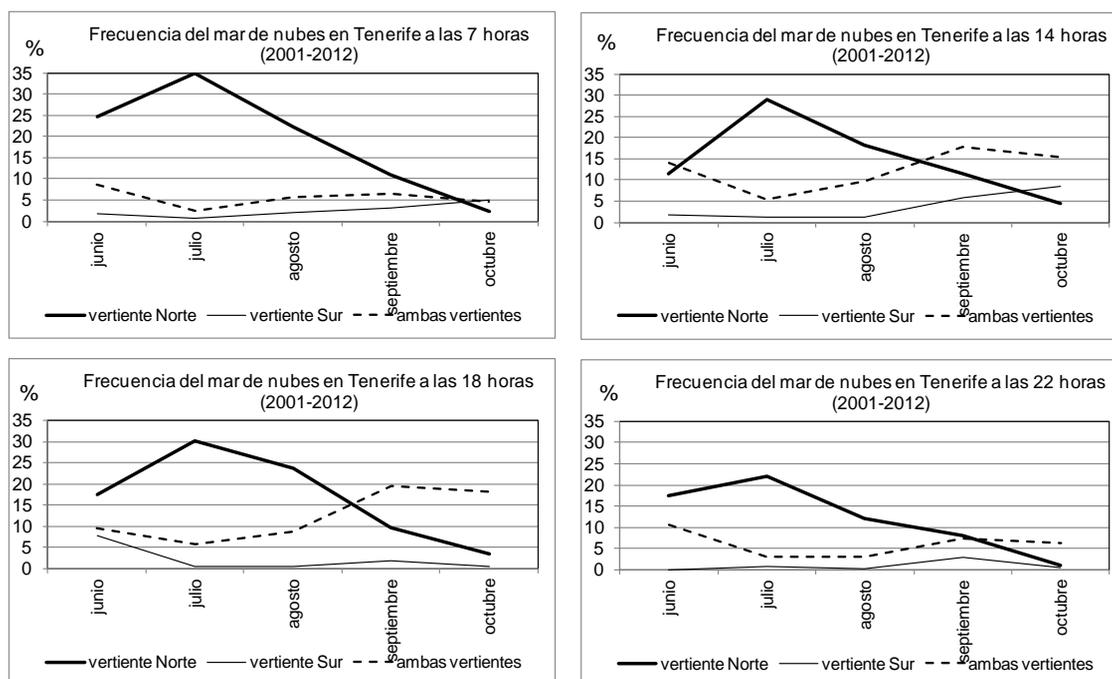
- 1) La mayor frecuencia del mar de nubes en La Orotava se produce en julio.
- 2) La escasa frecuencia de esta nubosidad en el valle de Güímar se repite durante los cinco meses.
- 3) En las cumbres, la escasa frecuencia de julio y agosto se contrarresta con un aumento considerable en el mes de octubre (tabla 1).
- 4) Hay un comportamiento opuesto en la frecuencia del mar de nubes entre La Orotava, con una reducción drástica de julio a octubre, y Güímar, y sobre todo las cumbres, donde se constata un nítido aumento de la nubosidad en los meses del otoño.

**Tabla 1;** Porcentajes de frecuencia del mar de nubes observados en los valles de La Orotava (Norte), de Güímar (Sur) y en la cumbre de Pedro Gil

Meses	Vertiente Norte	Vertiente Sur	Cumbres*
Junio	18%	3%	10%
Julio	29%	1%	4%
Agosto	19%	1%	6%
Septiembre	10%	3%	16%
Octubre	3%	4%	24%

\*Se contabiliza el total de horas con niebla (niebla seca + niebla mojadora)

La menor presencia de la nubosidad estancada en el valle de La Orotava a partir de julio se produce de forma continuada a lo largo de todo el día, como queda patente en los datos obtenidos a las cuatro horas de observación (figura 4). Sin embargo, en el caso del valle de Güímar, el ligero aumento de la nubosidad de julio a octubre se produce durante la mañana y hasta el mediodía (figura 4). En tercer lugar, se observa que hay un aumento, de julio a octubre, de una nubosidad simultánea en ambos valles a partir del mediodía y hasta el atardecer (figura 4).



**Figura 4;** Evolución mensual de la frecuencia del mar de nubes en los valles de La Orotava (N) y de Güímar (S) así como en ambos valles simultáneamente a cuatro horas del día (al amanecer, mediodía, atardecer y anochecer).

El estudio de la evolución anual del mar de nubes en los tres ámbitos analizados durante el verano en los doce últimos años deja patente una mayor frecuencia de esa nubosidad en el valle septentrional de La Orotava con respecto al de Güímar y a las cumbres (figura 5). Por otro lado, en el último decenio no se observa que esta nubosidad tenga una tendencia salvo cuando se contabiliza su simultaneidad en ambos valles porque en ese caso sí se constata una progresiva reducción del número de horas con nubes (figura 5).

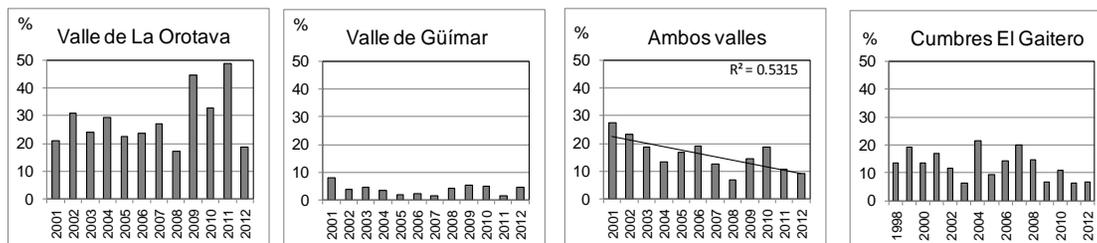


Figura 5; Evolución anual de la frecuencia del mar de nubes durante el verano en diferentes sectores de Tenerife

La figura 6 completa la información suministrada en las dos figuras anteriores. En ella se muestra el comportamiento de la nubosidad estival en las tres áreas de estudio, diferenciando lo que ocurre en los cuatro momentos del día en los que se efectúa el registro. Queda patente que la vertiente Norte y al atardecer es la que tiene mayor probabilidad de verse cubierta por el mar de nubes. Por el contrario, muy raras veces aparece esta nubosidad de forma aislada en la vertiente meridional y algo más frecuente es verla simultáneamente en ambas vertientes entre las 14 y 18 horas del día.

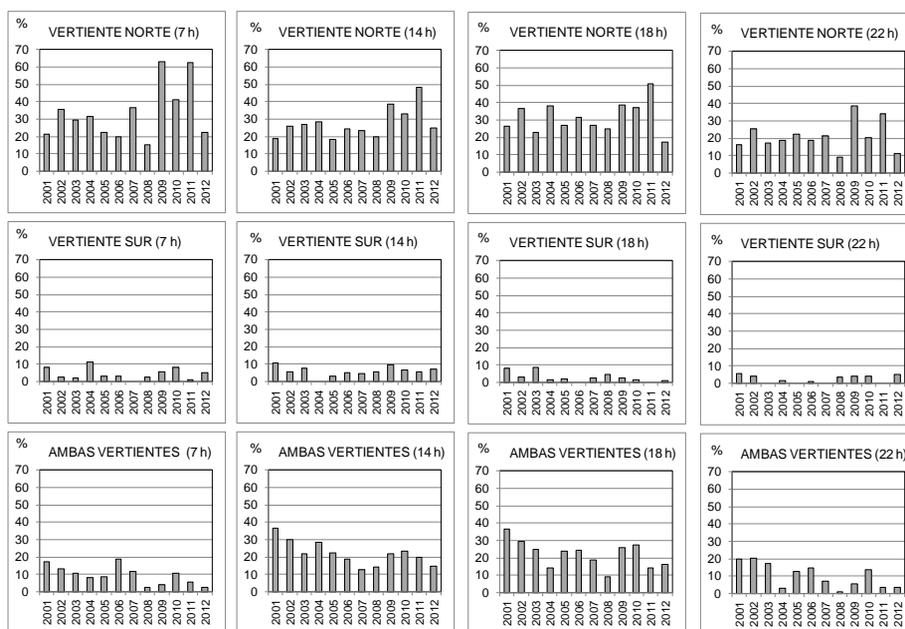
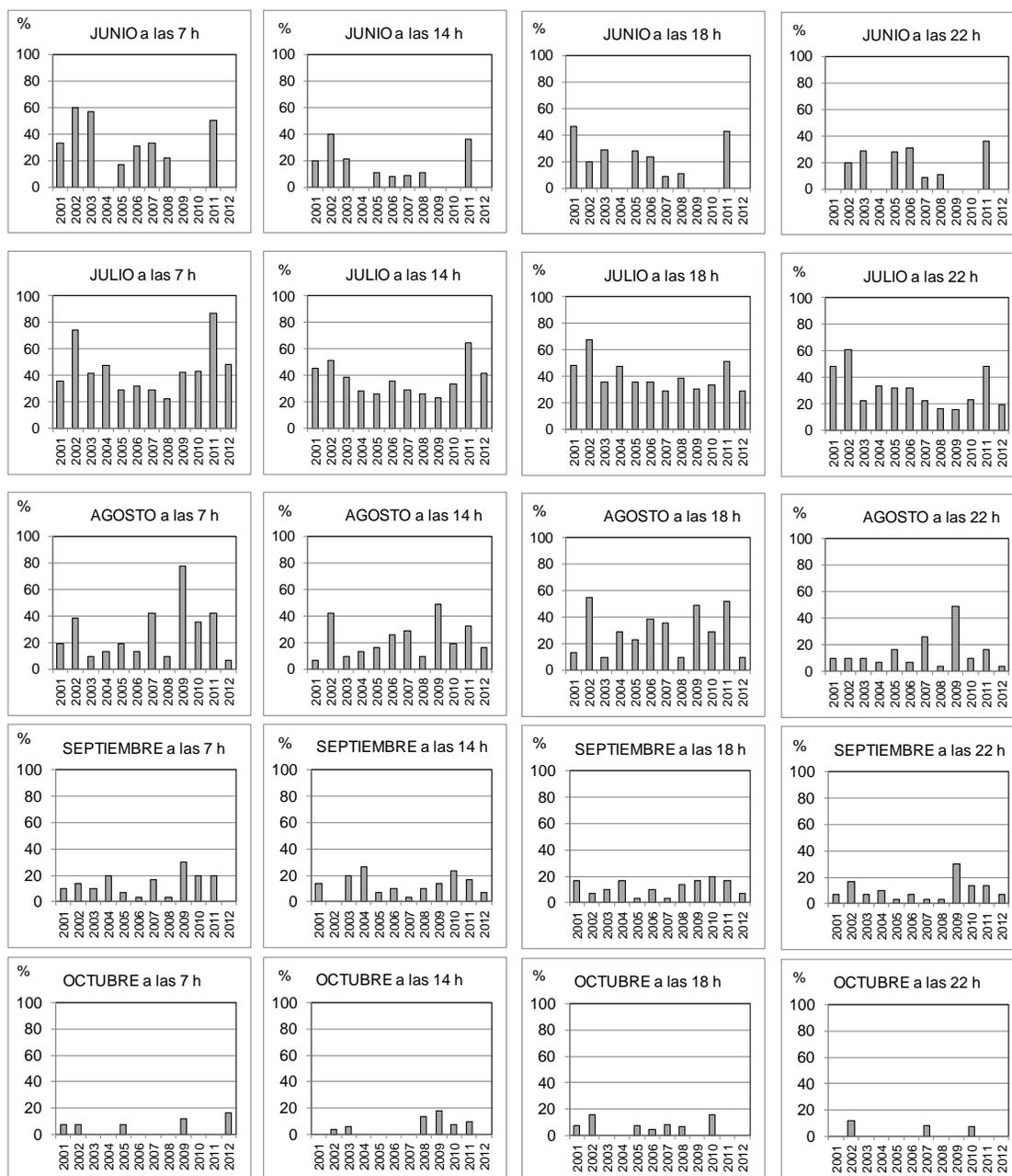


Figura 6; Evolución anual de la frecuencia media del mar de nubes en los valles de La Orotava y de Güímar así como en ambos valles simultáneamente desde junio a octubre, a cuatro horas del día (7, 14, 18 y 22 h), durante los últimos doce años.

En las figuras 7, 8 y 9 se detalla el porcentaje de horas de cada mes en el que el mar de nubes estuvo estancado en cada uno de los valles (figuras 7 y 8) y que la niebla cubría las cimas de El Gaitero a lo largo de los últimos doce años (figura 9).



**Figura 7;** Evolución de la frecuencia horaria del mar de nubes en el valle de La Orotava durante el verano (junio a octubre) a lo largo de cuatro momentos del día (7, 14, 18 y 22 horas)

En el caso de la vertiente septentrional, es patente el predominio del mar de nubes en julio a lo largo de todo el día. Le sigue en frecuencia agosto hasta las 18 horas. Por el contrario, es bastante menos habitual verlo en junio, septiembre y, sobre todo, octubre (figura 7).

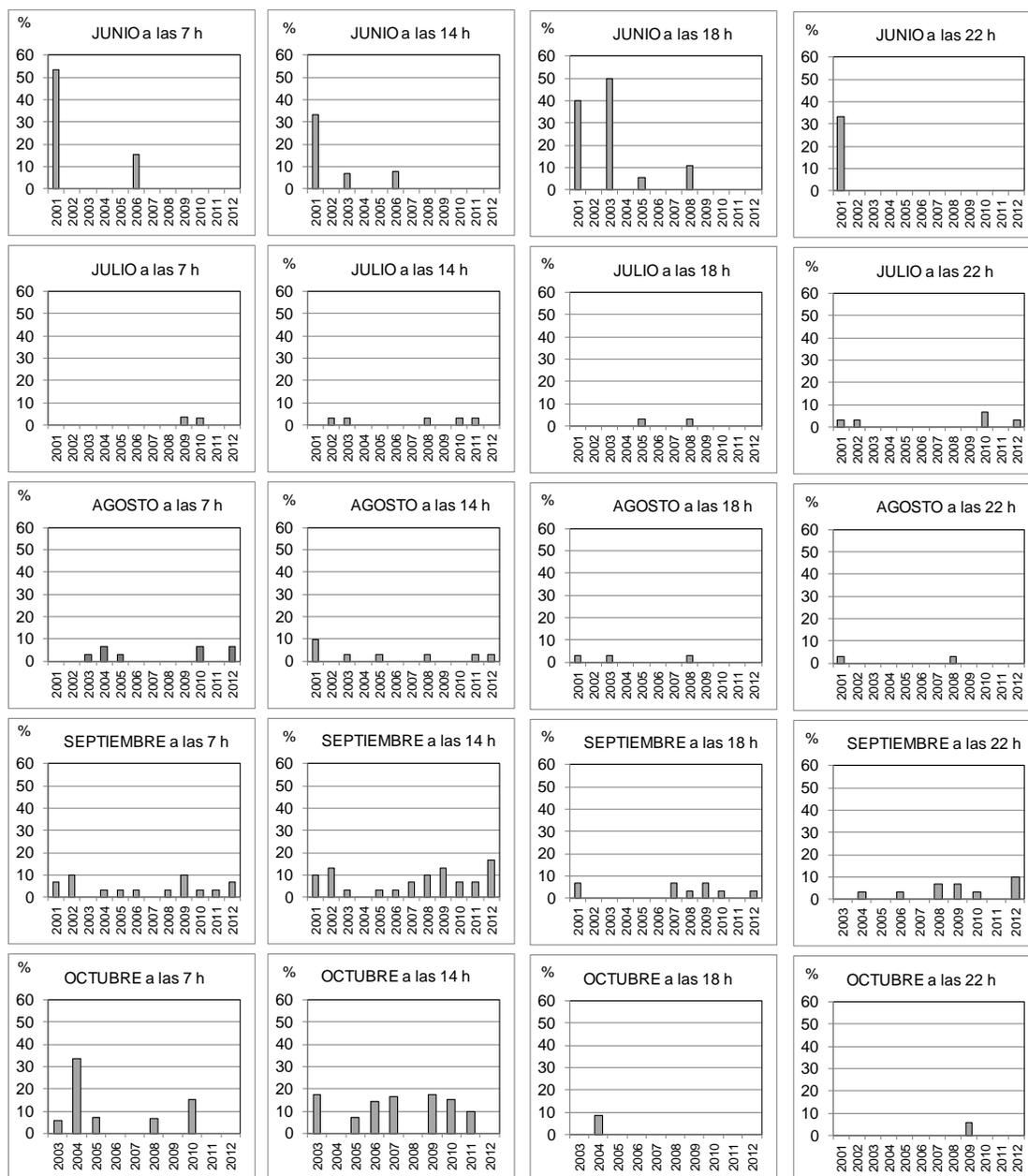


Figura 8; Evolución de la frecuencia horaria del mar de nubes en el valle de Güímar durante el verano (junio a octubre) a lo largo de cuatro momentos del día (7, 14, 18 y 22 horas)

El estancamiento del mar de nubes en la vertiente Sur es más probable que ocurra en septiembre y octubre a lo largo de la mañana y es muy raro que lo haga a partir del mediodía. En los restantes meses su presencia es muy escasa e irregular de un año a otro (figura 8).

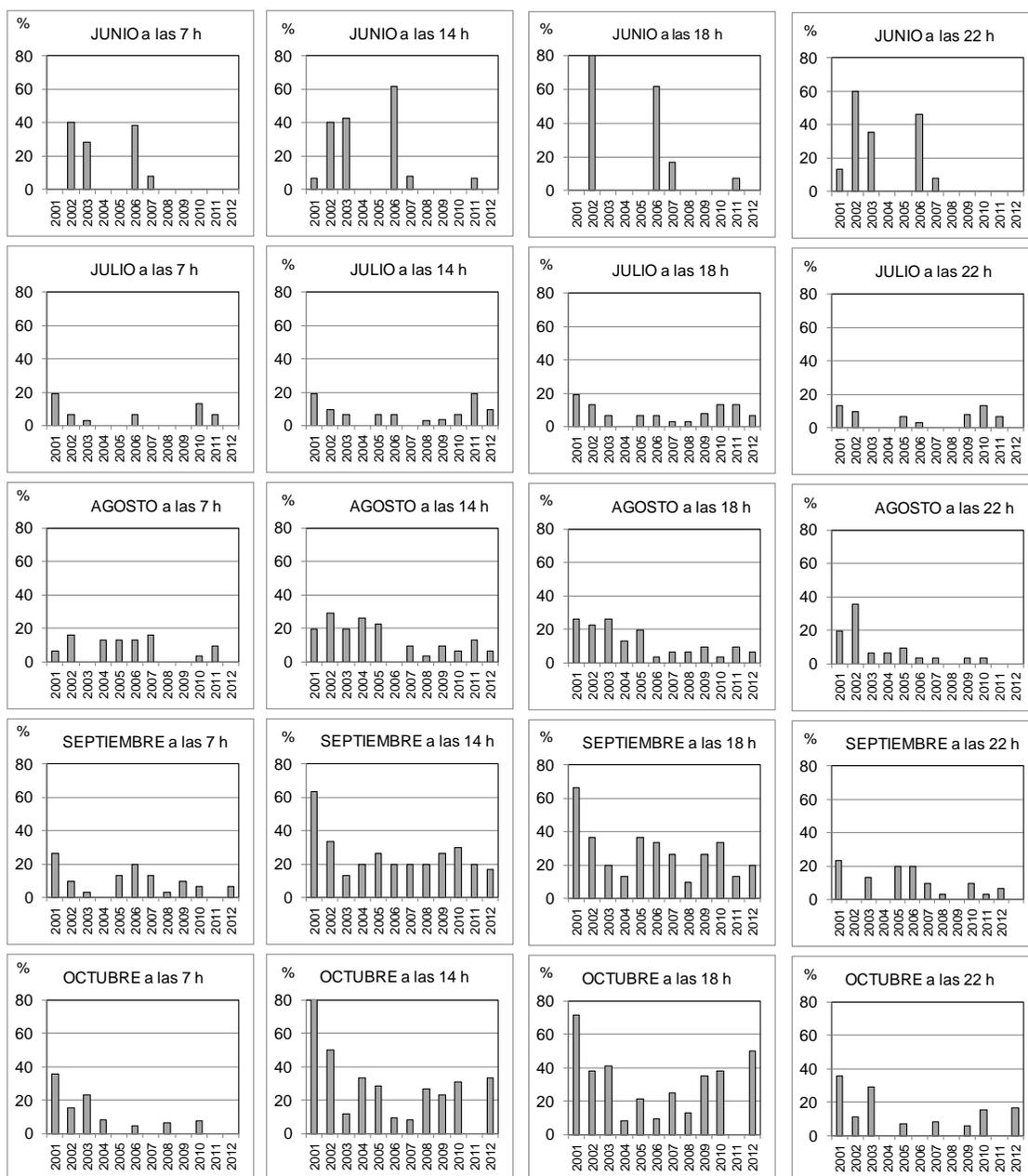


Figura 9; Evolución de la frecuencia horaria del mar de nubes estancada en los valles de La Orotava y de Güímar simultáneamente durante el verano (junio a octubre) a lo largo de cuatro momentos del día (7, 14, 18 y 22 horas)

La evolución horaria y anual de la nubosidad simultánea en ambos valles indica que es más frecuente desde el mediodía hasta el atardecer en los meses de septiembre, octubre y algo menos en agosto y julio (figura 9).

### **3.3. El aprovechamiento del agua del mar de nubes en El Gaitero**

Con el fin de estudiar la viabilidad de coleccionar de manera artificial parte del contenido líquido que contiene el mar de nubes se instaló, en marzo de 1996, un Standard Fog Collector (SFC, Schemenauer and Cereceda, 1994) en El Gaitero (ilustración 2). Se trata de una pantalla de 1 m<sup>2</sup>, forrada con una malla de polipropileno con una cobertura del 35%, situada perpendicular a los vientos húmedos y la niebla provenientes del Norte y que recoge las gotículas que impactan en ella.

La cantidad de agua obtenida por ese sistema durante los dos años siguientes fue de 2.736 L/m<sup>2</sup> frente a 970 L/m<sup>2</sup> de lluvia, registrada en un pluviómetro situado a pocos metros de distancia en el mismo período. Esos valores indican que se contabilizó casi tres veces más de agua en el sentido horizontal (SFC) que en el vertical (pluviómetro).

Desde entonces y hasta la actualidad se continúa investigando en este campo, confirmando esa relación entre ambos tipos de captaciones y la menor frecuencia de la nubosidad a esa altitud en verano frente al resto del año (Valladares, 1995, 1996; Marzol *et al.*, 2001, Hernando, 2005).



**Ilustración 2;** Standard Fog Colector (1 m<sup>2</sup>) utilizado en la investigación básica en El Gaitero, Tenerife. (© Sánchez Megía, 2012)

En el 2010, el Servicio Técnico de Planificación y proyectos forestales, del Área de medioambiente, sostenibilidad y aguas del Cabildo Insular de Tenerife instala cuatro atrapanieblas de 12 m<sup>2</sup> cada uno, dos en El Gaitero y otros dos en la Fuente del Joco, a 1.880 metros de altitud (ilustración 3).



**Ilustración 3;** Atrapanieblas (12 m<sup>2</sup>/c/u) construidos por el Cabildo Insular de Tenerife para coleccionar agua del mar de nubes en El Gaitero y en Fuente del Joco, Tenerife. (© Marzol, M<sup>a</sup> V. y García, P. respectivamente)

El agua colectada por esos atrapanieblas se almacena en depósitos próximos, con una capacidad de alrededor de 1.000 litros, y posteriormente se canaliza a dos depósitos de 150 y 400 m<sup>3</sup> respectivamente. El agua se destina a usos forestales, fundamentalmente la recarga de infraestructuras y a los vehículos que se utilizan en la lucha contra incendios forestales, así como al abastecimiento de bebederos para la avifauna de la zona. La tabla 2 muestra las cantidades de agua obtenidas en las ocho mediciones que el Área de medioambiente, sostenibilidad y aguas del Cabildo ha realizado en los dos atrapanieblas de El Gaitero desde su instalación hasta la actualidad, así como la precipitación registrada en el pluviómetro que hay cercano. Por el momento no es posible calcular la cantidad de agua que coleccionan los atrapanieblas procedente exclusivamente del mar de nubes y, además, establecer la relación de captación entre el SFC de 1 m<sup>2</sup>, la malla de 24 m<sup>2</sup> y la lluvia del pluviómetro por tres motivos:

- 1) En los días con lluvia, la base de los atrapanieblas, de aprox. 27 m<sup>2</sup>, recoge el agua de la lluvia y la canaliza al depósito, sin posibilidad de poder discriminar ese agua de la coleccionada por la malla (niebla + lluvia).
- 2) En numerosas ocasiones las mediciones realizadas han superado la capacidad del depósito, por lo que se desconoce la cantidad real de agua coleccionada.
- 3) Se desconoce cuál es la correlación de captación entre los dos tamaños de malla, 1 m<sup>2</sup> y 24 m<sup>2</sup>. En análisis realizados en Anaga y Teno con mallas de 1 m<sup>2</sup> (SFC) y ¼ m<sup>2</sup>

(Quarter Fog Collector de 50 cm x 50 cm) se concluyó que la primera no recogía cuatro veces más que la segunda sino tan sólo 3,6 (Marzol, 2002).

**Tabla 2;** Cantidades de agua colectadas en los atrapanieblas instalados en El Gaitero, Tenerife

Fechas	Litros/24m2	Precipitación (L/m2)
24/02/2011	900	
21/03/2011	>1000	288,8
27/04/2011	>1000	168,6
03/05/2011	>1000	188,4
21/07/2011	925	11,5
21/09/2011	360	6,1
02/05/2012	>1000	134,0
28/09/2012	>1000	48,0

FUENTE: Área de medioambiente, Sostenibilidad y Aguas. Cabildo Insular de Tenerife

En el caso de los lugares de experimentación situados en las cumbres de Anaga y Tenó Alto es posible realizar esa diferenciación porque las mallas están conectadas a estaciones meteorológicas automáticas que permiten saber, en períodos de 10 minutos, la cantidad de agua registrada en forma de lluvia por el pluviómetro y la colectada por las pantallas en el mismo espacio de tiempo. Con vistas al aprovechamiento del recurso no es necesario discriminar su origen, no así cuando se trata de saber qué cantidad es posible coleccionar de manera artificial del mar de nubes. En ese caso la manera de proceder es eliminar todos los períodos lluviosos y trabajar sólo con los que se tiene la certeza de que la malla ha coleccionado sólo agua de niebla.

#### 4. CONCLUSIONES

Es indiscutible el gran valor, tanto climático como ecológico, que posee la nubosidad del mar de nubes para las islas Canarias. Ese valor se acrecienta en los meses de verano porque contrarresta el largo período de sequía al que el anticiclón de las Azores somete al archipiélago y aporta importantes cantidades de agua y humedad ambiental al monte verde de las medianías septentrionales.

Su frecuencia y eficacia en ese sector altitudinal está estudiada y demostrada pero se desconocía cuáles eran sus características cuando se aproxima a las cimas mucho más altas del sector central de la isla. Ahora sabemos que el mar de nubes sobrepasa las cumbres de la dorsal tinerfeña con mayor frecuencia en septiembre y octubre que en los tres meses estivales, y en las horas del mediodía más que en las nocturnas. Ahora bien, esa dinámica temporal no coincide con la que ofrece más posibilidades de aprovechamiento del agua que contiene, ya

sea de manera natural por la vegetación o artificial por los atrapanieblas. Y es que, la niebla mojadora en este sector de Tenerife tiene un horario nocturno claro, siendo más frecuente desde el atardecer (20 horas) hasta las 9 de la mañana. Es en ese período cuando hay más posibilidades de conseguir la captación de agua del mar de nubes en ese lugar, mientras que la nubosidad dominante en las horas del mediodía se trata de una niebla seca que no aporta agua.

Al comparar lo que ocurre durante el verano en ambas vertientes, es evidente que la septentrional es la que ostenta la mayor frecuencia del estancamiento del mar de nubes, sobre todo en el mes de julio. Si se trata de saber cuándo es más probable que ambos valles permanezcan bajo los efectos de las nubes a la vez, no hay duda que son septiembre y octubre, desde el mediodía hasta el atardecer.

Finalmente, en un contexto general de necesidad de detectar tendencias en el comportamiento de las variables climáticas hay que decir que no se observa ninguna evidencia en la evolución del mar de nubes estival en los últimos quince años.

#### **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo es reflejo de la inestimable colaboración durante todos estos años del personal del Cabildo Insular de Tenerife en las torres contra incendios: Gualberto Martín, Sinfiriano Expósito, Santiago Campos, David Rodríguez, Jose Manuel Guanche, José Manuel Pérez y José Manuel Armas. Muchas gracias a todos por su participación en el conocimiento del mar de nubes estival en el sector central de la isla de Tenerife.

#### **REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA**

- Aboal, J.R.; Jiménez, M.S.; Morales, D.; y Gil, P. 2000. Effects of Thinning on Throughfall in Canary Islands Pine Forest. *The Role of Fog. Journal of Hydrology*: 238 (3), 218-230.
- Cereceda, P.; Schemenauer, R.; y Carvajal, N. 1988. Factores topográficos que determinan la distribución de las neblinas costeras en el Tofo (IV Región de Coquimbo-Chile). En X Congreso Nacional de Geografía y I Jornadas de Cartografía temática, B1-B4. Santiago de Chile. Chile.
- Cereceda, P. y Schemenauer, R. 1996. La niebla: recurso para el desarrollo sustentable de zonas con déficit hidrológico. En Marzol, M<sup>a</sup> V., Dorta, P. y Valladares, P. eds. *Clima y agua: la gestión de un recurso climático*. Madrid. Tabapress.
- Dorta, P. 1996. Las inversiones térmicas en Canarias. *Investigaciones Geográficas*: 15, 109-124.
- Hernando, T. 2005. Captación de agua de la niebla en el sector central de la vertiente norte de Tenerife (Islas Canarias, España). Trabajo de Fin de carrera. Escuela Técnica Superior de Ciencias Agrarias. Universidad de La Laguna. Inédito.
- Klemm, O.; Schemenauer, R.; Lummerich, A.; Cereceda, P.; Marzol, V.; Corel, D.; Heerden, van J.; y Reinhard, D. 2012. Fog as a Fresh-Water Resource: Overview and Perspectives. *Ambio*: 41 (3), 221-234.
- Luis, M.; Arozena, M<sup>a</sup> E.; Beltrán, E.; Dorta, P.; y Marzol, M<sup>a</sup> V. 1994. La influencia del clima en la variación del pinar de Tenerife (Islas Canarias). *Annals do Instituto Superior de Agronomía*, vol I, XLIV, fasc. 1: 393-406.

- Marzol, M<sup>a</sup> V. 2002. Fog wáter collection in a rural park in the Canary islands (Spain). *Atmospheric Research*: 64, 239-250.
- Marzol, M<sup>a</sup> V. 2003. La captación del agua de la niebla en la isla de Tenerife. Santa Cruz de Tenerife: CajaCanarias.
- Marzol, M<sup>a</sup> V. 2008. Temporal Characteristics of Fog Water Collection during Summer in Tenerife (Canary Islands, Spain). *Atmospheric Research*: 87, 352-361.
- Marzol, M<sup>a</sup> V.; Rodríguez, J.; Arozena, M<sup>a</sup> E.; y Luis, M. 1988. Rapport entre la dynamique de la mer de nuages et la vegetation au Nord de Tenerife (Îles Canaries). En *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, vol 1, 273-283. Aix-en-Provence. Francia: l'Association Internationale de Climatologie.
- Marzol, M<sup>a</sup> V.; Dorta, P.; Valladares, P.; y Pérez, R. 1997. Le potentiel hydrique de la base de la mer de nuages à Tenerife (Îles Canaries). En *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, vol 10, 93-101. Quebec. Canadá: l'Association Internationale de Climatologie.
- Marzol, M<sup>a</sup> V. and Valladares, P. 1998. Evaluation of fog water collection in Anaga (Tenerife, Canary Islands). En *Proceeding of 1<sup>st</sup> International Conference on Fog and Fog Collection*, 449-452. Vancouver, Canadá: International Development Research Centre (IDRC).
- Marzol, M<sup>a</sup> V.; Valladares, P.; y Dorta, P. 2001. Métodos de la nubosidad: su aplicación a las cumbres de Tenerife (Islas Canarias). En Manero, F. coord. *Espacio natural y dinámicas territoriales. Homenaje al Dr. Jesús García Fernández*. 251: 263. Universidad de Valladolid.
- Marzol, M<sup>a</sup> V. and Sánchez Megía, J.L. 2008. Fog Water Harvesting in Ifni, Morocco. An Assesment of Potential and Demand. *Die Erde*: 139 (1-2), 97-119.
- Marzol, M<sup>a</sup> V.; Sánchez Megía, J.; and García Santos, G. 2010. Effects of Fog on the Climatic conditions of the subtropical mountain cloud forest in the Canary Islands. En Bruijnzeel, L.A.; Scatena, F.N. and Hamilton, L.S. Eds. *Tropical Montane Cloud Forests*. 359:364. Cambridge University Press.
- Prada, S. and Silva, M. 2001. Contribução da Precipitação oculta para os Recursos Hídricos subterráneos da Ilha da Madeira. *Comun Institute Geol. Min.*: 84 (2), 118-121.
- Schemenauer, R. 1992. The use of fog for groundwater recharge in arid regions. En *proceeding Seminar on Groundwater and the Environment in Arid and semiArid Areas*, 84-91. Beijing, China: Chinese Academy of Geological Sciences.
- Schemanauer, R. and Joe, P. 1989. The collection's role in water planning for developing countries. *Natural Resources Forum*: 18 (2), 91-100.
- Schemenauer, R. and Cereceda, P. 1991. Fog-water collection in Arid coastal locations. *Ambio*: 20 (7), 303-309.
- Schemenauer, R. and Cereceda, P. 1994. A proposed Standard Fog Collector for Use in High-Elevation Regions. *Journal of Applied Meteorology*: 33 (11), 1313-1322.
- Sabino, A. 2001. Potential Regions for Fog water collection in Cape Verde. En *Proceeding of 2<sup>o</sup> International Conference on Fog and Fog collection*, 269-272. New Foundland, Canadá: International Development Research Centre (IDRC).
- Semenzato, R.; Falcial, M.; y Bresci, E. 1998. The Project "Fog as a never source for the sustainable development of the ecosystems of the Peruvian and Chilean coastal desert. En *Proceeding of 1<sup>st</sup> International Conference on fog and fog collection*, 457-460. Vancouver, Canadá: International Development Research Centre (IDRC).
- Valladares, P. 1995. Estudio geográfico del mar de nubes en la vertiente norte de Tenerife. *Memoria de Licenciatura. Departamento de Geografía. Universidad de La Laguna*
- Valladares, P. 1996. Propuesta metodológica para el estudio del Mar de Nubes: el caso del año 1989 en el norte de Tenerife. *Investigaciones Geográficas*: 15, 99-108.

## ESTIMACIÓN DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL EN EL PARQUE NACIONAL DE LA CALDERA DE TABURIENTE

Mongil Manso, Jorge. Grupo de Hidrología y Conservación, Universidad Católica de Ávila.  
*jorge.mongil@ucavila.es*

**RESUMEN:** El modelo del Número de Curva se utiliza habitualmente para estimar la escorrentía superficial que genera un aguacero determinado. En la práctica, su aplicación consiste en localizar el número de curva en una tabla, que depende principalmente del uso del suelo o tipo de vegetación, de la condición hidrológica y del tipo de suelo. Con este número se calcula la escorrentía mediante la ecuación propuesta por el modelo. Estas tablas están elaboradas para los tipos de suelos y vegetación de los Estados Unidos. En este trabajo se presenta una adaptación de las tablas del número de curva para las formaciones vegetales y usos del suelo del Parque Nacional de la Caldera de Taburiente (isla de La Palma, España), mediante el análisis de los factores que condicionan el número de curva.

### 1. INTRODUCCIÓN

El método del Número de Curva es un modelo conceptual uniparamétrico que relaciona la precipitación con la escorrentía, cuyo objetivo es calcular la escorrentía superficial generada por un aguacero en una cuenca de pequeñas dimensiones y no aforada (Mishra & Singh 2003; Mongil 2007; Hawkins *et al.* 2009; Cao 2011). Ha sido desarrollado por el *Soil Conservación Service* (SCS) –llamado desde 1994 *National Resources Conservation Service* (NRCS)- del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), para cuencas no aforadas en las que se deseen estimar los caudales circulantes por métodos hidrometeorológicos. Aunque su base teórica ha sido cuestionada (Cao 2011), se ha convertido en una potente herramienta hidrológica cuando en la cuenca no existen datos detallados, ampliamente utilizada en gran variedad de climas y condiciones diversas, e incorporado a diversos modelos para el cálculo de una gran cantidad de cuestiones relacionadas con la escorrentía superficial y el agua en el suelo.

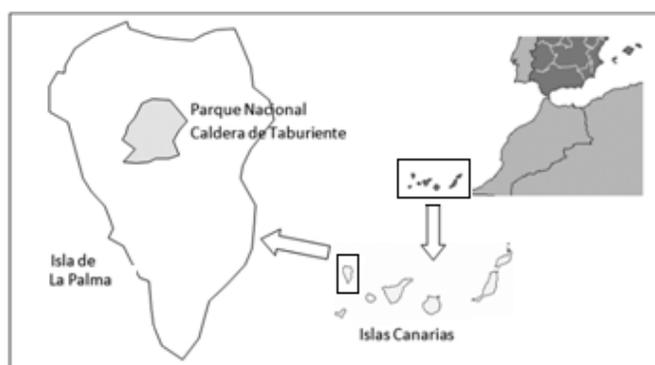
La determinación de los números de curva debe hacerse mediante la instalación de parcelas experimentales con un aforador de escorrentía (Descheemaeker *et al.* 2008; Huang *et al.* 2006) o mediante datos de cuencas aforadas ajustados por algún método de calibración, como número de curva mediano, número de curva medio geométrico, método asintótico o ajuste no lineal por mínimos cuadrados, entre otros (Hjelmfelt *et al.* 1982; Hauser & Jones 1991; Hjelmfelt 1991; Tedela *et al.* 2008; Hawkins *et al.* 2009). No obstante, con costes mucho menores, es posible hacer una adaptación de las tablas del número de curva por analogía de tipos de vegetación, como ya hiciera Martínez de Azagra (1996) para las zonas áridas del sureste de la Península Ibérica.

En este trabajo se presentan unas tablas del número de curva para las principales formaciones vegetales o usos del suelo del Parque Nacional de la Caldera de Taburiente, mediante la

adaptación de las tablas del número de curva existentes. Se trata de una primera aproximación para la asignación de los valores del número de curva en las mencionadas condiciones, ya que determinar los números de curva sirve para estimar volúmenes de escorrentía y caudales máximos de avenida como respuesta a una precipitación (Mongil 2009).

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

Parque Nacional de la Caldera de Taburiente está situado en el centro de la isla de La Palma, en las Islas Canarias (figura 1). Al igual que el resto del archipiélago, la isla de La Palma emergió desde el fondo del océano gracias a varias erupciones volcánicas. La Caldera de Taburiente es una gran depresión de origen erosivo y rodeada por un circo de cumbres de unos 8 km de diámetro, en el que se encuentran las mayores altitudes de la isla. Desde estas cotas, el relieve desciende drásticamente hacia el interior de la Caldera en escarpes prácticamente verticales de más de 800 m, hasta alcanzar la cota 430 m en su punto más bajo, lo que supone unos desniveles cercanos a los 2.000 m (MMAMRM 2009a). Al suroeste, la Caldera de Taburiente se abre hacia el mar a través del Barranco de las Angustias, que es el único desagüe natural de los numerosos y profundos arroyos y barrancos del Parque. Entre los barrancos, como resultado de la erosión, se elevan numerosas crestas y roques, entre los que hay que destacar el Roque Idafe y el Roque del Huso. La erosión genera continuos cambios en la Caldera, muy patentes a simple vista. La aparición y desaparición de cascadas, y los desprendimientos son muy frecuentes en los desniveles del Parque. La Caldera posee un caudal de agua considerable, y cuenta con más de 70 manantiales y galerías. Sin embargo, debido a la densa red de conducciones que parten de ella para el aprovechamiento de agua para abastecimiento a poblaciones o regadío, el caudal del barranco de las Angustias ya no tiene carácter permanente.



**Figura 1** ; Situación del Parque Nacional de la Caldera de Taburiente

La Caldera de Taburiente posee un clima de tipo mediterráneo, pero modificado por la latitud, la altitud y la orientación. Los factores que determinan el clima de la isla de La Palma son, además de la latitud, la circulación de los vientos alisios, el relieve, la cercanía del continente africano y la corriente fría del Atlántico. En el interior de la Caldera se encuentran ligeras variaciones climáticas en función de la altitud: (1) Zona baja (400-800 m): Sin heladas, precipitaciones escasas y sin nieblas; (2) Zona media (800-1.500 m): Clima más contrastado en temperaturas, nieblas abundantes y no suelen producirse heladas; (3) Zona alta (por encima de 1.500 m): Nieblas menos habituales y temperaturas frescas. Por encima de 2.000 m suele nevar todos los años en invierno, y a veces se produce cencellada debido a los vientos del norte que traen hielo, y pueden alcanzarse -10 °C. La cumbre se caracteriza por baja humedad relativa, lluvias torrenciales en otoño e invierno y periodos de sequía.

La precipitación media anual es de 966 mm en la estación de Taburiente (106U).

La metodología ha consistido en analizar los diferentes factores que influyen en el modelo del Número de Curva, mediante transeptos seguidos en el interior del Parque Nacional, utilizando los principales senderos existentes, dada la dificultad para el desplazamiento fuera de los caminos. En estos trayectos se fueron recogiendo datos sobre: tipos de vegetación (formaciones arboladas, de matorral o herbáceas, indicando especies y espesuras), afloramientos rocosos, suelos (descripción del perfil, roca madre, espesor de restos vegetales y de humus, toma de muestras), condiciones hidrológicas (para la infiltración y escorrentía) y pendientes. El análisis se apoyó en la cartografía temática disponible (de vegetación, litología y suelos), facilitada por la dirección del Parque Nacional, y en las ortofotografías aéreas del Sigpac (MMAMRM 2009b). Con la información recogida se realizó la valoración de los diferentes factores que afectan al número de curva, para llegar finalmente a las tablas adaptadas a las formaciones vegetales de la Caldera de Taburiente.

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

A pesar de que el Parque Nacional cuenta con casi cuatrocientas especies catalogadas de plantas vasculares, algunas de ellas endémicas e incluidas en el Catálogo Nacional de Especies Amenazadas (MMAMRM 2009a), la formación más característica de La Caldera consiste en el pinar de *Pinus canariensis* Chr. Sm. Ex DC, acompañado por especies como el amagante (*Cistus symphytifolius* Lam.). El pinar presenta diferentes densidades de arbolado que van desde unos pocos pies/ha hasta unos 2.500 pies/ha. Existen también en La Caldera laderas cubiertas de diferentes especies de matorral y otras desprovistas de vegetación, con acumulaciones de materiales volcánicos finos, pedregales y paredes rocosas.

Para la realización de unas tablas del número de curva para La Caldera, se ha realizado la correspondencia hidrológica de tipos de vegetación o usos del suelo, que se muestra en la tabla 1. Para los pinares de pino canario se parte de una hipótesis de correspondencia hidrológica con las masas de *Pinus ponderosa* (Douglas ex P. & C. Lawson) del oeste de los Estados Unidos, concretamente de los estados de Oregón y Washington, basada en consideraciones fitoclimá-

ticas y morfológicas. Estos pinares están localizados sobre los terrenos volcánicos de Cascade Range y tienen un clima con sequía estival. Es patente su similitud estructural e hidrológica con los pinares de La Palma, incluso las formas de erosión y el aspecto paisajístico es similar. Las tablas originales para estos pinares están definidas sólo para suelos tipo B y C, por lo que se han deducido los números de curva para los suelos de los grupos A y D, mediante relaciones de proporcionalidad, considerando que para cada condición hidrológica, la diferencia entre los números de curva con suelo A y suelo B, y entre los números de curva con suelo C y suelo D, es igual a la que existe entre los números de curva con suelo B y suelo C.

Así mismo, los matorrales de la Caldera se han hecho equivalentes hidrológicamente a los matorrales con herbáceas de las tablas generales del número de curva. Los terrenos sin vegetación (pedregales y roquedos) se han considerado rocas permeables o impermeables, según la modificación que hace Ferrer-Julíà (2003) de las tablas de Témez (1987) (tabla 2).

**Tabla 1 ;** Correspondencia de tipos de vegetación para las tablas del número de curva

Vegetación de la Caldera	Vegetación equivalente
Pinar de <i>Pinus canariensis</i>	Pinar de <i>Pinus ponderosa</i> del Oeste de EEUU
Matorrales	Matorral con vegetación herbácea
Terrenos desprovistos de vegetación (pedregales, roquedos)	Rocas permeables o impermeables

En las tablas del número de curva para los pinares de pino canario en La Caldera, se proponen cuatro clases de condición hidrológica dependientes sólo de la fracción de cabida cubierta (20, 40, 60 y 80 %), puesto que la cantidad de humus y pinocha acumulada depende fundamentalmente de la espesura del arbolado (figura 2). Para las superficies de matorral se han considerado fracciones de cabida cubierta de <50 %, 50-75 % y >75 %.

Los suelos presentes en La Caldera son litosoles (suelos minerales brutos) sobre rocas magmáticas volcánicas (basaltos, lavas y fonolitas, por un lado, y rocas piroclásticas por otro) y magmáticas plutónicas (sienitas y microsienitas). Según la Soil Taxonomy (USDA 2010), se puede hablar de suelos perteneciente al orden Entisoles (suelos con perfil poco diferenciado, de tipo AR, AC o ACR; epipedión ócrico y sin endopedión de diagnóstico), suborden Orthent (Entisoles en pendiente o con presencia de fragmentos de roca). Al tratarse, como se ha dicho, de suelos muy poco evolucionados y de escasa profundidad, la asignación a un determinado grupo de suelo depende fundamentalmente del comportamiento hidrológico de la roca madre. Así, las sienitas y fonolitas son rocas bastante impermeables, siendo fácil presumir que los suelos formados sobre ellas se asignarán a los grupos C o D. Por el contrario, las rocas piroclásticas suelen poseer elevada capacidad de infiltración, por lo que se deben asignar a los grupos A o B. En cualquier caso para una correcta asignación del grupo de suelo es preciso seguir las instrucciones al respecto de NRCS (2007).

En la tabla 2 se muestran los números de curva en condición previa de humedad II para las formaciones vegetales de La Caldera de Taburiente (figura 2), con pendiente menor o igual del 5 %. Para pendientes superiores a este valor es necesario corregir el número de curva que aparece en la tabla con la expresión de Williams (1995):

$$CN_{II} = \frac{(CN_{III} - CN_{II})}{3} \cdot [1 - 2 \cdot e^{-13,86 \cdot pt}] + CN_{II}$$

Donde:

$CN_{II}$  = Número de curva modificado por la pendiente en condición II de humedad

$CN_{II}$  = Número de curva sin modificar en condición II de humedad

$CN_{III}$  = Número de curva sin modificar en condición III de humedad

$pt$  = Pendiente media de la ladera o cuenca en tanto por uno

En la tabla 3 aparecen los números de curva en condición II de humedad previa para los terrenos sin vegetación (pedregales y roquedos) (figura 2).

**Tabla 2 ;** Números de curva (condición II de humedad y  $P_0=0,2 \cdot S$ ), con pendiente  $\leq 5$  %, para las formaciones vegetales de La Caldera de Taburiente

Tipo de vegetación	FCC (%)	Tipo de suelo			
		A	B	C	D
Pinares de <i>Pinus canariensis</i>	20	56	67	78	89
	40	47	60	72	85
	60	40	55	69	84
	80	34	50	66	83
Matorrales	< 50	48	67	77	83
	50 – 75	35	56	70	77
	> 75	30	48	65	73

FCC = Fracción de cabida cubierta (%)

**Tabla 3 ;** Números de curva (condición II de humedad y  $P_0=0,2 \cdot S$ ), para los terrenos sin vegetación (pedregales, roquedos) de La Caldera de Taburiente

Tipo de terreno	Pendiente (%)	Tipo de suelo			
		A	B	C	D
Rocas permeables	$\geq 3$	94			
	< 3	91			
Rocas impermeables	$\geq 3$	96			
	< 3	93			

Para obtener los números de curva en condiciones previas de humedad distintas a la condición II, deben modificarse los números de curva de las tablas 2 y 3 con las siguientes ecuaciones (Ponce y Hawkins 1996):

$$N(I) = \frac{N(II)}{2,281 - 0,01281 \cdot N(II)} \quad N(III) = \frac{N(II)}{0,427 + 0,00573 \cdot N(II)}$$

Una vez conocido el número de curva, la estimación de la escorrentía superficial se realiza mediante las siguientes ecuaciones (considerando que  $P_0=0,2 \text{ S}$ ):

$$E_s = Q = \frac{(P - P_0)^2}{P + 4 \cdot P_0} \quad \text{si } P > P_0$$

$$E_s = Q = 0 \quad \text{si } P \leq P_0$$

Siendo:

$E_s = Q =$  Escorrentía superficial (mm)

$P =$  Precipitación del aguacero (mm)

$P_0 =$  Umbral de escorrentía previo al encharcamiento (mm), que se determina a partir del número de curva (NC):

$$P_0 = 0,2 \cdot \frac{25.400 - 254 \cdot NC}{NC}$$



**Figura 2 ;** Algunas formaciones vegetales y usos del suelo de La Caldera de Taburiente. De arriba abajo y de izquierda a derecha: Pinar denso en las proximidades del barranco de Taburiente (NC=66); Fustal de pino canario con importante acumulación de pinocha en el suelo, en la subida a Hoyo Verde (NC=69); Pendientes abruptas de rocas impermeables (NC=96); Laderas de fuertes pendientes con rocas permeables (NC=94).

#### 4. CONCLUSIONES

La determinación de los números de curva requiere datos procedentes de parcelas experimentales o cuencas en las que se afore la escorrentía generada en respuesta a varios aguaceros. Sin embargo, es posible establecer una aproximación de los números de curva para diversos tipos de vegetación, y en concreto para las masas de *Pinus canariensis*, los matorrales y los terrenos sin vegetación de La Caldera de Taburiente, por comparación con tipos de vegetación similares, que tengan comportamientos hidrológicos análogos. Consecuentemente, las tablas que se exponen en este trabajo deben tomarse como aproximadas, mientras no se compruebe su validez mediante datos experimentales de campo.

#### REFERENCIAS

- Cao, H.; Vervoort, R.W.; Dabney, S.M. 2011. Variation in curve numbers dedrived from plot runoff data for New South Wales (Australia). *Hydrol. Process.* 25: 3774-3789.
- Descheemaeker, K.; Poesen, J.; Borselli, L.; Nyssen, J.; Raes, D.; Haile, M.; Muys, B.; Deckers, J. 2008. Runoff curve numbers for steep hillslopes with natural vegetation in semi-arid tropical highlands, northern Ethiopia. *Hydrol. Process.* 22, 4097-4105.
- Ferrer-Julà, M. 2003. Análisis de nuevas fuentes de datos para la estimación del parámetro número de curva: perfiles de suelos y teledetección. Cuadernos de investigación, CEDEX, Madrid.
- Hauser, V.L.; Jones, O.R. 1991. Runoff curve numbers for the southern high plains. *Transactions American Society of Agricultural Engineers*, 3(1): 142-148.
- Hawkins, R.H.; Ward, T.J.; Woodward, D.E.; Van Mullem, J.A. 2009. Curve number hydrology. State of the practice. ASCE, Reston.
- Hjermfelt, A.T.; Kramer, L.A.; Burwell, R.E. 1982. Curve numbers as random variables. En: Singh, V.P. (Ed.) (1982). Rainfall-runoff relationship. Proceedings of the International Symposium on Rainfall-Runoff Modeling held May 18-21 (1981) at Mississippi State University, Littleton, Colorado, Water Resources Publication.
- Hjermfelt, A.T. 1991. An investigation of the curve number procedure. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(6): 725-737.
- Huang, M.; Gallichand, J.; Wang, Z.; Goulet, M. 200. A modification to the Soil Conservation Service curve number method for steep slopes in the Loess Plateau of China. *Hydrol. Process.* 20, 579-589.
- Martínez De Azagra, A. 1996. Diseño de sistemas de recolección de agua para la repoblación forestal. Ed. Mundi-Prensa, Madrid.
- Mishra, S.K.; Singh, V.P. 2003. Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) methodology. Kluwer Academic Publishers, Dodrecht.
- MMAMRM 2009a. Parque Nacional de la Caldera de Taburiente. Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino. <http://reddeparquesnacionales.mma.es/parques/taburiente/index.htm> (15/4/2011)
- MMAMRM 2009b. Sistema de Información Geográfica de Parcelas Agrícolas (SIGPAC). Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino. <http://sigpac.mapa.es/fega/visor/> (15/4/2011)
- Mongil, J. 2007. Estimación de la escorrentía superficial mediante el modelo del número de curva. Serie NENYA nº 4. Grupo de Hidrología y Conservación de Suelos, Ávila.

- Mongil, J. 2009. Adaptación de las tablas del Número de Curva para las formaciones vegetales del Parque Nacional de la Caldera de Taburiente (isla de La Palma, España). *Boletín Geológico y Minero*, 121 (2): 179-188.
- NRCS 2007. Part 630. Hydrology. National Engineering Handbook. Natural Resources Conservation Service, Washington D.C.
- Ponce, V.M.; Hawkins, R.H. 1996. Runoff curve number: Has it reached maturity?. *Journal of hydrologic engineering*, January 1996.
- Tedela, N.; McCutcheon, S.; Rasmussen, T.; Tollner, W. 2008. Evaluation and improvements of the Curve Number Method of hydrological analysis on selected forested watersheds of Georgia. The University of Georgia.
- Témez, J.R. 1987. Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. MOPU. Dirección General de Carreteras, Madrid.
- USDA 2010. Keys to Soil Taxonomy. <http://soils.usda.gov/technical/classification> (26-10-2012).
- Williams, J.R. 1995. The EPIC Model. En: *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Highlands Ranch C.

## ANÁLISIS CLIMÁTICO DEL INCENDIO FORESTAL DE TENERIFE COMARCAS DE ABONA E ISORA: 15 A 21 DE JULIO DE 2012

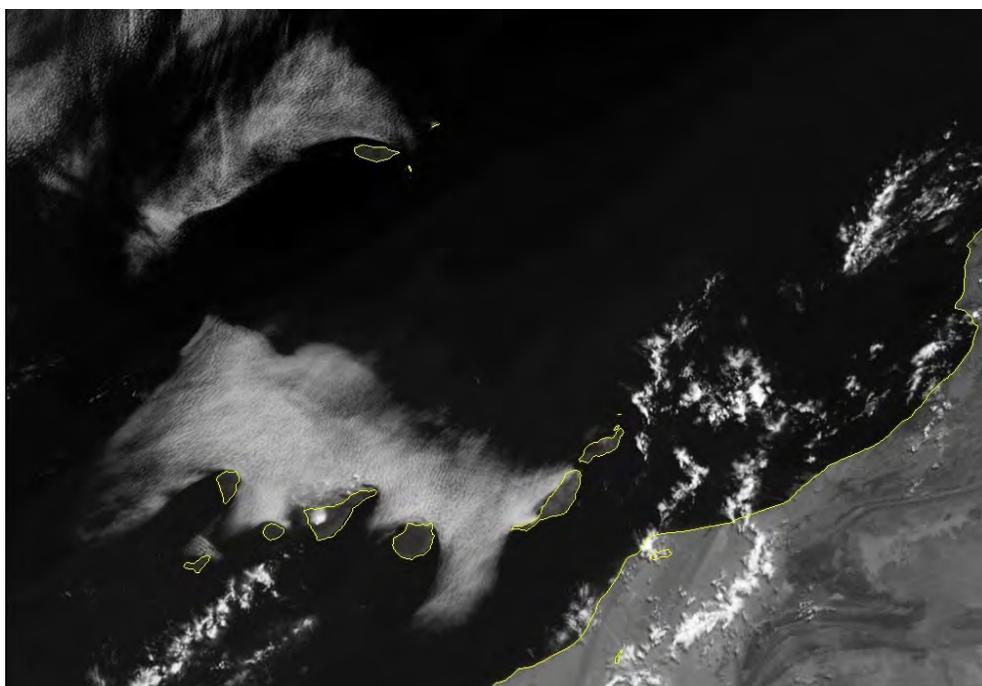
Santana Pérez , Luis Manuel  
*luisp2006@gmail.com*

**RESUMEN:** La isla de Tenerife cuenta con una de las masas de pinares canarios más sobresalientes del Archipiélago Canario, que ocupa una amplia franja alrededor de la isla entre los 700-800 m s.m. y 2000 m s.m.. Los boques de pinos canarios han sufrido una intensa explotación a lo largo del tiempo que comienza justo después de la conquista de Canarias y llega hasta la década de los años 50 del pasado siglo, que redujeron sus masas de forma considerable. Sin embargo, hay que destacar que las repoblaciones llevadas a cabo desde esa época hasta la actualidad, unido al escaso aprovechamiento maderero que se hace de este bosque hoy en día, ha incrementado de manera notoria la superficie forestal de pino canario en Tenerife. Esta situación que pudiera parecer ideal para esta formación vegetal se ve perturbada por los innumerables incendios que cada año le afecta, constituyendo el mayor peligro que acecha a este bosque en la actualidad. Hay que destacar que Tenerife sufre a lo largo del año unos treinta y cinco incendios o conatos forestales y que periódicamente entre 4 y 10 años, algunos de éstos se convierten en un gran incendio. Aunque bien es cierto que el pino canario es un árbol con una gran capacidad de rebrote después de un incendio, éste no deja de representar un serio problema para el ecosistema, además de los riesgos que entraña el fuego para las personas y bienes de las zonas afectadas, con daños que resultan muy cuantiosos para la sociedad. Indudablemente uno de los factores que van a condicionar, de manera importante, el desarrollo de incendio son sin duda los climáticos, altas temperaturas, baja humedad y fuerte viento son los ingredientes propicios para que un conato se convierta en un gran incendio, por eso el presente trabajo, referido a un análisis climático del último gran incendio forestal de Tenerife que afectó a las comarcas de Abona e Isora del 15 al 21 de julio de 2012, nos muestra como influyen las condiciones meteorológicas en el devenir del incendio. Estos datos que el autor analiza y nos presenta de forma ordenada y secuenciada, fueron posible gracias a la amplia y densa red meteorológica que tiene esta Isla, sobre todo la que dispone el Cabildo de Tenerife a través del Área de Agricultura por medio de la Red de Agrocabildo donde se obtiene información en directo de datos meteorológicos básicos capturados cada 12 minutos, además de la que mantiene el Área de Medio Ambiente en las zonas forestales, fundamentalmente pluviométrica. Por otra parte cabe destacar que en el presente trabajo se expone de manera novedosa, contornos y perfiles a partir de datos horarios de precisión, que fueron la guía seguida para la evolución de los fenómenos climáticos durante el incendio del pasado verano en la zona sur de la Isla. A través de su análisis, el autor hace un seguimiento de la “ola calorífica” donde se puede constatar, en tiempo casi real, el aumento de la temperatura, la caída espectacular de la humedad del aire, los cambios de la dirección del viento, a la vez como desaparece el efecto anabático catabático, también como disminuye la radiación solar, a la vez que se eleva la evapotranspiración de manera alarmante, es decir se presentan de una forma precisa las condiciones óptimas para la propagación el fuego.

## 1. INTRODUCCIÓN

El Gobierno de Canarias ha asumido la dirección del incendio declarado este mediodía en el sur de Tenerife. El incendio forestal ha afectado a más 60 hectáreas de vegetación y tiene activos dos frentes, tras controlarse el del Barranco del Infierno. Uno de los frentes está situado en la zona de pista arañada en el municipio de Adeje y el otro en Teresme, en el municipio de Vilaflor, que es donde trabajan numerosos efectivos para impedir que alcance la corona forestal de la isla.

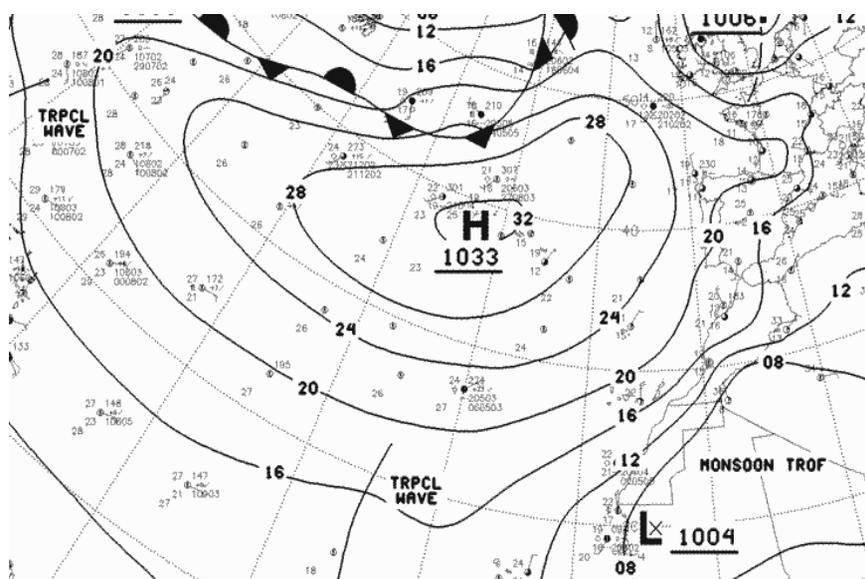
El fuego comenzó el 15 de julio a las 15:00 horas en una zona de huertas de Vilaflor y como consecuencia del avance de las llamas han sido desalojadas varias casas de los núcleos de Ifonche, La Quinta y Taucho. El fuego, que afecta a una zona de pinar y monte bajo del sur del Tenerife, ha entrada en la reserva natural del Barranco del Infierno y se trata que no llegue a la corona forestal. El fuego se considera oficialmente controlado el 21 de julio. (José Luis Sandoval, 15 de julio de 2012)



**Figura 1:** Imagen del satélite Meteosat 9 (visible): 17 de julio a las 11 h UTC. La nubosidad que presenta la vertiente oeste de Tenerife es humo provocado por el incendio forestal.

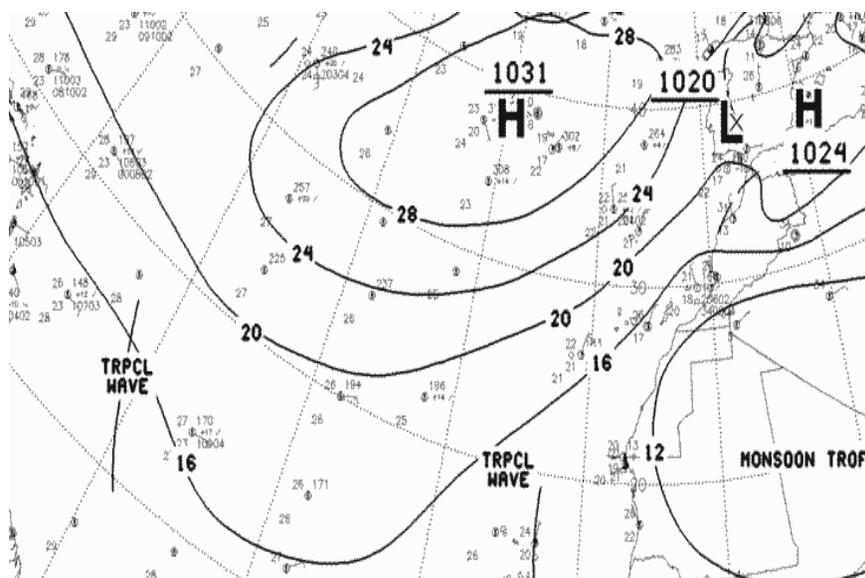
El satélite nos indica nubes estratiformes poco desarrolladas en las costas norte a este de las islas Canarias debido al anticiclón intenso centrado al oeste de Galicia y la baja presión sahariana poco profunda. Vientos muy débiles a débiles en las costas de las vertientes oeste a norte, vientos débiles a fuertes en las costas de las vertientes este y sur, vientos moderados en las medianías. Temperaturas calientes ( $20\text{ C} < T \leq 25\text{ C}$ ) en la costa; temperaturas muy calientes ( $25\text{ C} < T \leq 35\text{ C}$ ) en las medianías. Cielos despejados.

## 2. SITUACIONES METEOROLÓGICAS EN DÍAS ANTERIOR Y DURANTE AL INCENDIO FORESTAL



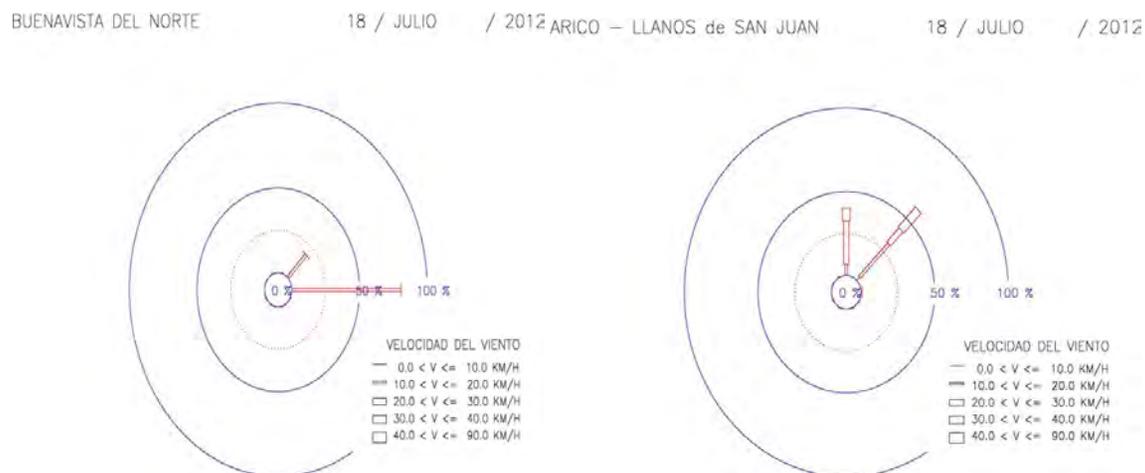
**Figura 2:** Situación sinóptica el 11 de julio de 2012 0 UTH. Vientos alisios

Situación meteorológica: Anticiclón Atlántico. El mapa sinóptico indica altas presiones sobre el Atlántico Oriental centradas en las Azores (1033 mb) y presencia de bajas presiones sobre el Sahara Occidental. Soplan los vientos alisios moderados a fuertes en las islas Canarias.



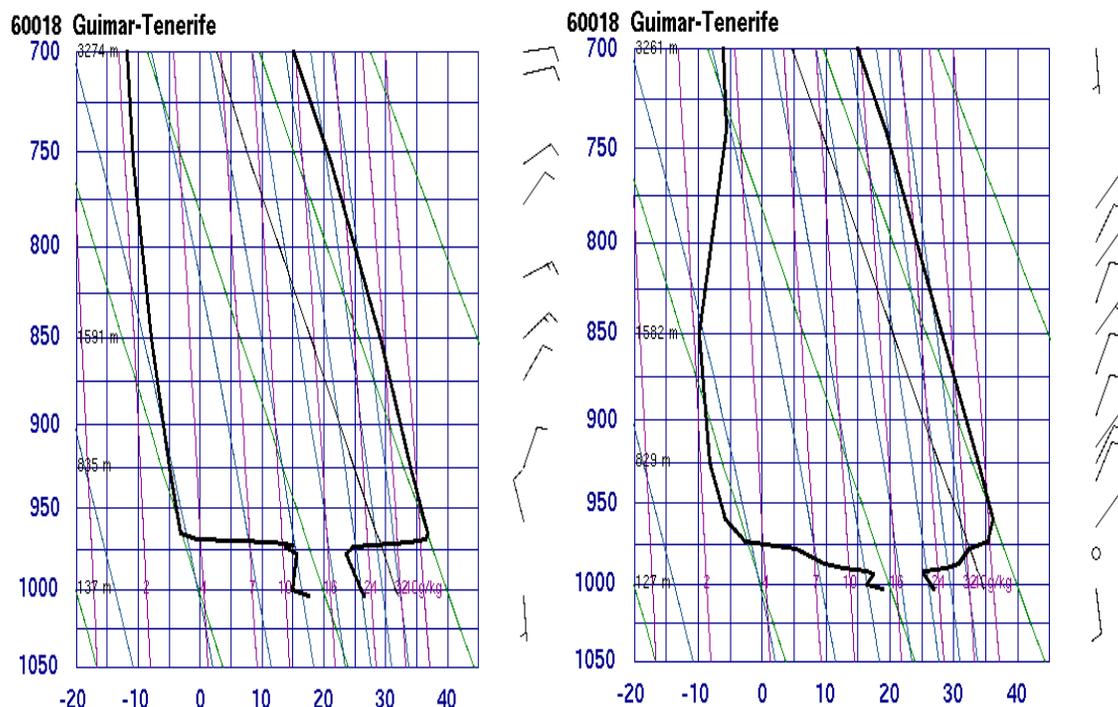
**Figura 3:** Situación sinóptica el 18 de julio de 2012 0 UTH.

Situación meteorológica: Anticiclón Atlántico. El mapa sinóptico indica altas presiones sobre el Atlántico Oriental centradas en las Azores (1031 mb) y presencia de bajas presiones sobre el Sahara Occidental. Soplan los vientos alisios débiles a moderados en las islas Canarias.



**Figura 4:** Rosas de vientos en las costas noroeste y sureste: Buenavista del Norte y Arico

En Buenavista del Norte (66 m), los vientos moderados soplan en el sector NE a E son frecuentes y en la dirección E son dominantes; datos climáticos: 22.3 °C, 88 %, 14.5 km/h, 21.2 MJ/m<sup>2</sup>, ETP 3.9 mm y dirección dominante E. Arico – Los Llanos de San Juan (135 m), los vientos moderados soplan en la dirección NE y son poco frecuentes; los vientos moderados soplan en el sector N a NE y en la dirección NE son frecuentes; los vientos fuertes soplan en el sector N a NE y son frecuentes; los vientos muy fuertes soplan en el sector N a NE y la dirección NE son dominantes; datos climáticos: 25.5 °C, 70 %, 23 km/h, 27.2 MJ/m<sup>2</sup>, ETP 6.5 mm y dirección dominante NE.



**Figura 5:** Radiosondeos de días de vientos ALISIOS (Güimar, 17 y 18 a las 12 h UTH)

La curva de la derecha del gráfico es una curva de estado o estado termodinámico de la atmósfera, correspondiente a un día típico anticiclónico donde soplan vientos alisios poco intenso en las islas Canarias. Observaciones día 17 a las 12 h UTH: descenso uniforme de la temperatura hasta 377 m, inversión térmica muy acusada entre 377 m a 450 m, descenso suave de la temperatura hasta 3000 m. Vientos débiles soplan en el sector SW a NW en cotas inferiores a 525 m. Vientos débiles a moderados soplan en el sector N a NE en cotas superiores a 600 m. Observaciones día 18 a las 12 h UTH: ligero descenso de la temperatura hasta 200 m, notable ascenso de las temperaturas hasta 495 m, inversión térmica, descenso suave de la temperatura hasta 3000 m. Vientos débiles y vientos moderados soplan en el sector N a NE en cotas comprendidas entre los 200 m y 2000 m.

### 3. DÍA POSTERIOR AL INCENDIO FORESTAL. SOPLAN LOS ALISOS

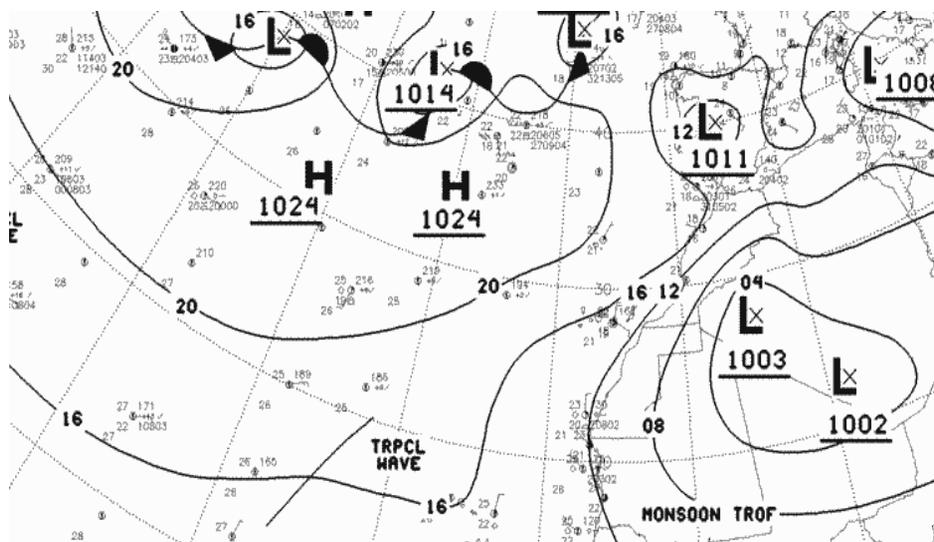


Figura 6: Situación sinóptica el 24 de julio de 2012 (0 UTH). Vientos alisios

El mapa sinóptico indica altas presiones poco intensas en el Atlántico Central y Oriental centradas a una latitud semejante a la del estrecho de Gibraltar, bajas presiones centradas en la península Ibérica y sureste de Marruecos. Soplan vientos alisios moderados en las islas Canarias.

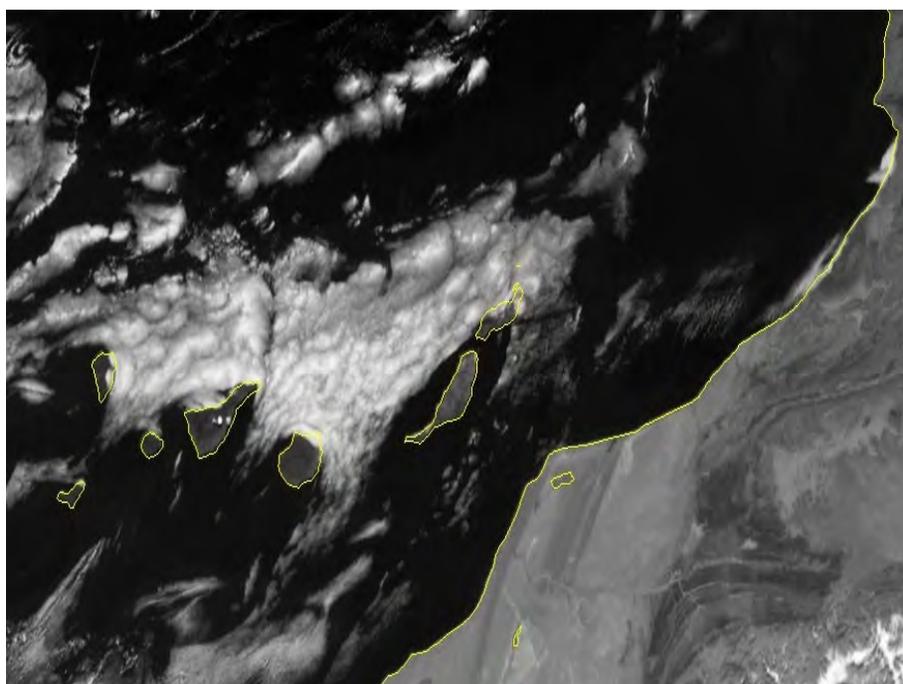
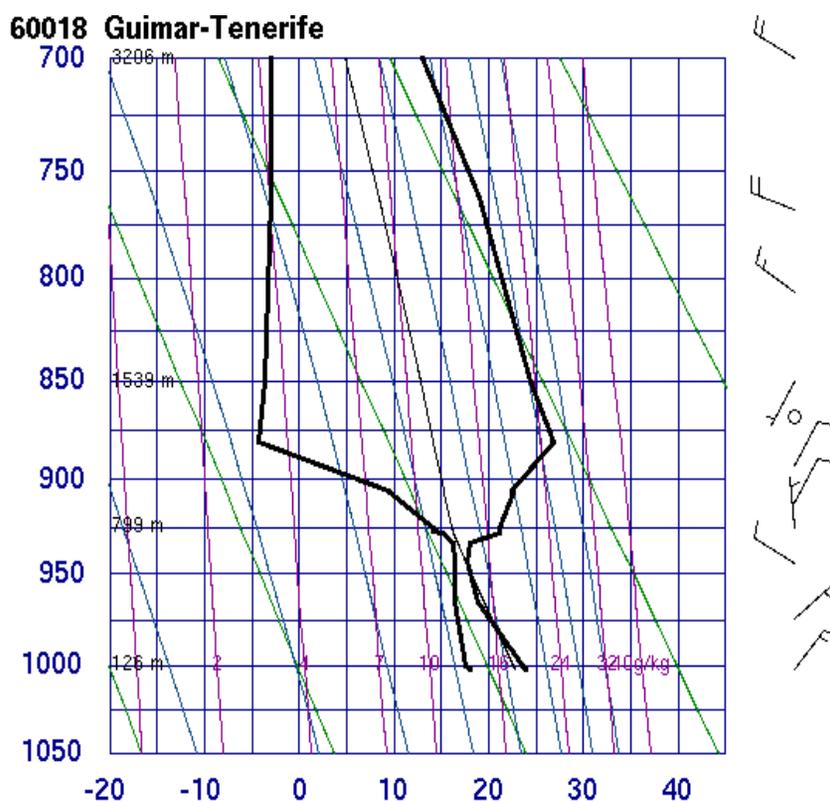


Figura 7: Imagen del satélite Meteosat 9 (visible): 24 de julio a las 12 h UTC.

Las imágenes nos indican nubes estratiformes sobre Canarias debido al anticiclón moderadamente intenso situado en el Atlántico. Vientos muy débiles a moderados en las vertientes norte y oeste, y vientos débiles a fuertes en las vertientes este y sur; nubes orográficas en las laderas occidentales del Valle de Güimar. Temperaturas cálidas a calientes, nubes y claros en la vertiente norte; temperaturas calientes y cielos despejados en la vertientes sur y oeste.



**Figura 8:** Radiosondeo un día de vientos ALISIOS (Güimar, 24 de julio a las 12 h UTH)

La curva de la derecha del gráfico es una curva de estado o estado termodinámico de la atmósfera, correspondiente a un día típico anticiclónico donde soplan vientos alisios débiles a moderados en las islas Canarias. Notable descenso de la temperatura hasta 630 m; moderado ascenso de las temperaturas hasta 1225 m, capa atmosférica con una amplia inversión térmica, descenso suave de la temperatura hasta 3000 m. Vientos moderados soplan en el sector N a NE en cotas inferiores a 430 m; vientos débiles soplan en el sector W a N entre los 430 m a 800 m; vientos débiles y vientos moderados soplan en el sector N a NE entre las cotas 800 m a 1360 m; vientos débiles soplan en el sector S a SW en cotas comprendidas entre 1360 m a 1550 m; vientos moderados soplan en el sector W a N en cotas superiores a 1550 m.



**Figura 9:** Rosas de viento en las costas noroeste y sureste: Buenavista del Norte y Arico

En Buenavista del Norte (66 m), los vientos débiles soplan en la dirección E y son poco frecuentes; los vientos moderados soplan en el sector NE a E, en la dirección N son poco frecuentes y en la dirección E son dominantes; datos climáticos: 22.2 °C, 82 %, 13.9 km/h, 18.3 MJ/m<sup>2</sup>, ETP 3.9 mm y dirección dominante E. Arico – Los Llanos de San Juan (135 m), los vientos moderados soplan en la dirección N y son poco frecuentes; los vientos fuertes y los vientos muy fuertes soplan en el sector N a NE y son frecuentes; datos climáticos: 22.2 °C, 87 %, 30 km/h, 27.2 MJ/m<sup>2</sup>, ETP 4.4 mm y dirección dominante NE.

#### 4. PERFILES DE OBSERVACIONES METEOROLÓGICAS EN LA VERTIENTE SUR DURANTE EL INCENDIO FORESTAL: COMARCAS DE ABONA E ISORA

Las estaciones meteorológicas de Tenerife se han instalado siguiendo transeptos, líneas imaginarias en dirección costa a montaña. Trazamos transeptos de observaciones meteorológicas en las comarcas afectadas por el incendio forestal; comarcas de Isora y Abona.

En el periodo nocturno (medianoche a madrugada), la noche es cálida a muy caliente en la costa y medianía baja, cotas inferiores a 700 m es notable el ascenso termométrico; la medianía baja a zona de montaña es muy caliente, cotas superiores a 700 m es muy ligero el descenso termométrico. En el periodo diurno (horas anteriores a mediodía), la mañana es caliente a muy caliente en la costa y medianía baja, cotas inferiores a 700 m es notable el ascenso termométrico; la medianía baja a zona de montaña es muy caliente, cotas superiores a 700 m es ligero el descenso termométrico. En el periodo diurno (horas posteriores a mediodía y comienzo de la tarde) es caliente a muy caliente en la costa y medianía baja, cotas inferiores a 700 m es notable el ascenso termométrico; la medianía baja a zona de montaña es muy caliente, cotas superiores a 700 m es ligero el descenso termométrico. En el periodo nocturno (horas anteriores a medianoche) es caliente a muy caliente en la costa y medianía baja, cotas inferiores a 700 m es notable el ascenso termométrico; la medianía baja a zona de montaña es muy caliente a caliente, cotas superiores a 700 m es ligero el descenso termométrico.

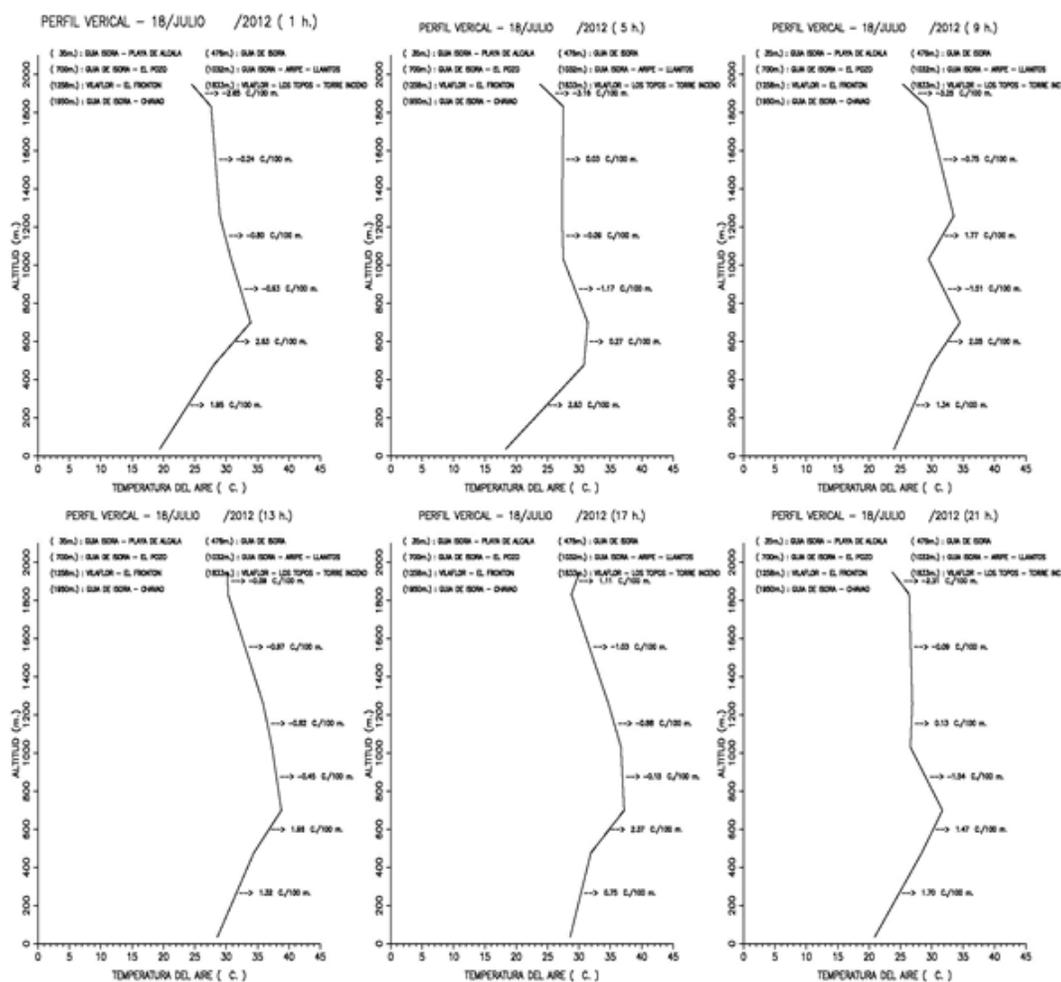


Figura 10: Perfil termométrico vertical en un transecto de la comarca de ISORA el 18 de julio de 2012

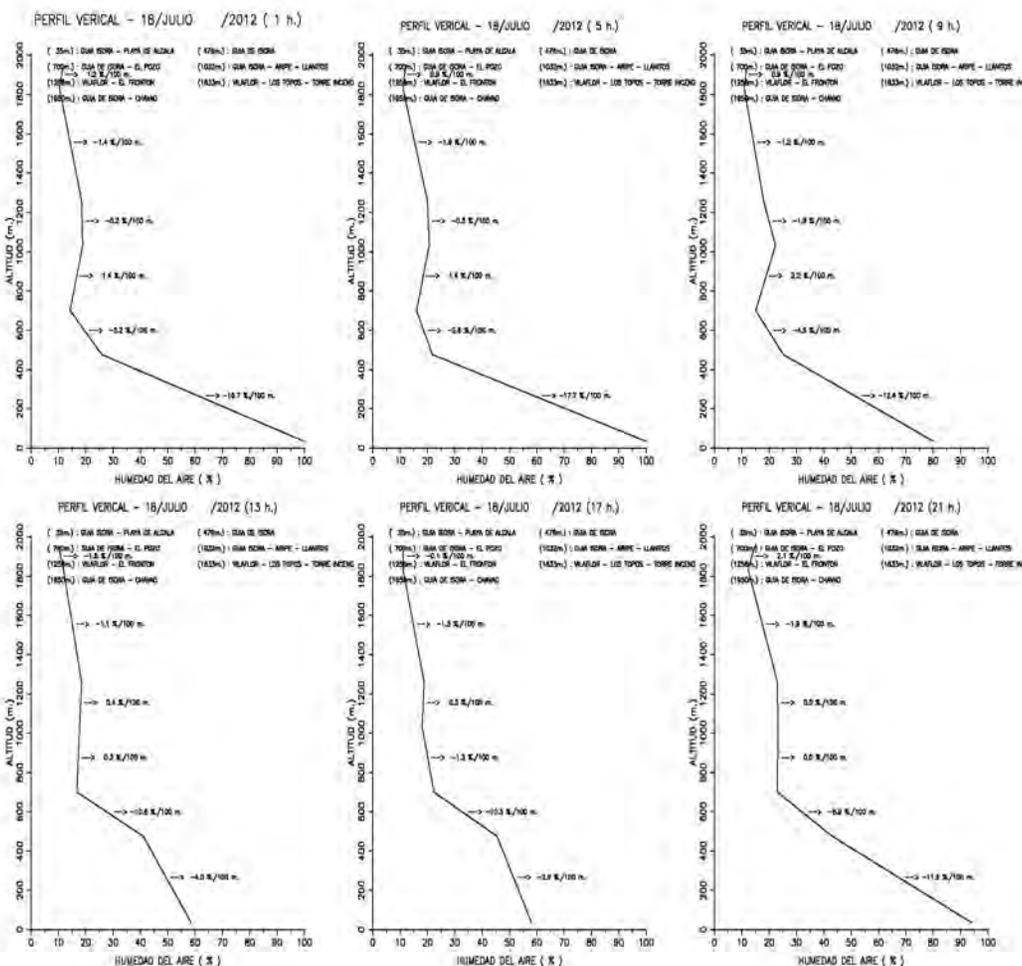


Figura 11: Perfil higrométrico vertical en la comarca de ISORA el 18 de julio de 2012. SOTAVENTO

Los perfiles están constituidos con las estaciones agrometeorológicas: Playa Álcala (35 m), Guía de Isora (476 m), El Pozo (700 m), Los Llanitos (1032 m), El Frontón (1258 m), Los Topos (1833 m) y Chavao (1950 m). En el periodo nocturno (medianoche a madrugada), la noche es muy húmeda a muy seca en la costa y medianía baja, cotas inferiores a 480 m es muy brusco el descenso higrométrico; la medianía baja a zona de montaña es muy seca, cotas superiores a 480 m es ligero el descenso higrométrico. En el periodo diurno (horas anteriores a mediodía), la mañana es húmeda a muy seca en la costa y medianía baja, cotas inferiores a 480 m es notable el descenso higrométrico; la medianía baja a zona de montaña es muy seca, cotas superiores a 480 m es irrelevante el descenso higrométrico. En el periodo diurno (horas posteriores a mediodía y comienzo de la tarde) es semihúmeda a muy seca en la costa y medianía baja, cotas inferiores a 700 m es notable el descenso higrométrico; la medianía baja a zona de montaña es muy seca, cotas superiores a 700 m es ligero el descenso higrométrico.

En el periodo nocturno (horas anteriores a medianoche) es muy húmeda a muy seca en la costa y medianía baja, cotas inferiores a 700 m es muy brusco el descenso higrométrico; la medianía baja a zona de montaña es muy seca, cotas superiores a 700 m es ligero el descenso higrométrico. Las humedades extremas en los periodos tetrahorarios son los siguientes: 10 % / 100 % (1 h), 11 % / 100 % (5 h), 11 % / 80 % (9 h), 10 % / 59 % (13 h), 11 % / 58 % (17 h), 12 % / 94 % (21 h). Las temperaturas extremas en los periodos tetrahorarios son los siguientes: 19.4 C / 33.9 C (1 h), 18.3 C / 31.4 C (5 h), 24 C / 34.5 C (9 h), 28.6 C / 38.8 C (13 h), 28.6 C / 37.2 C (17 h), 20.9 C / 31.7 C (21 h).

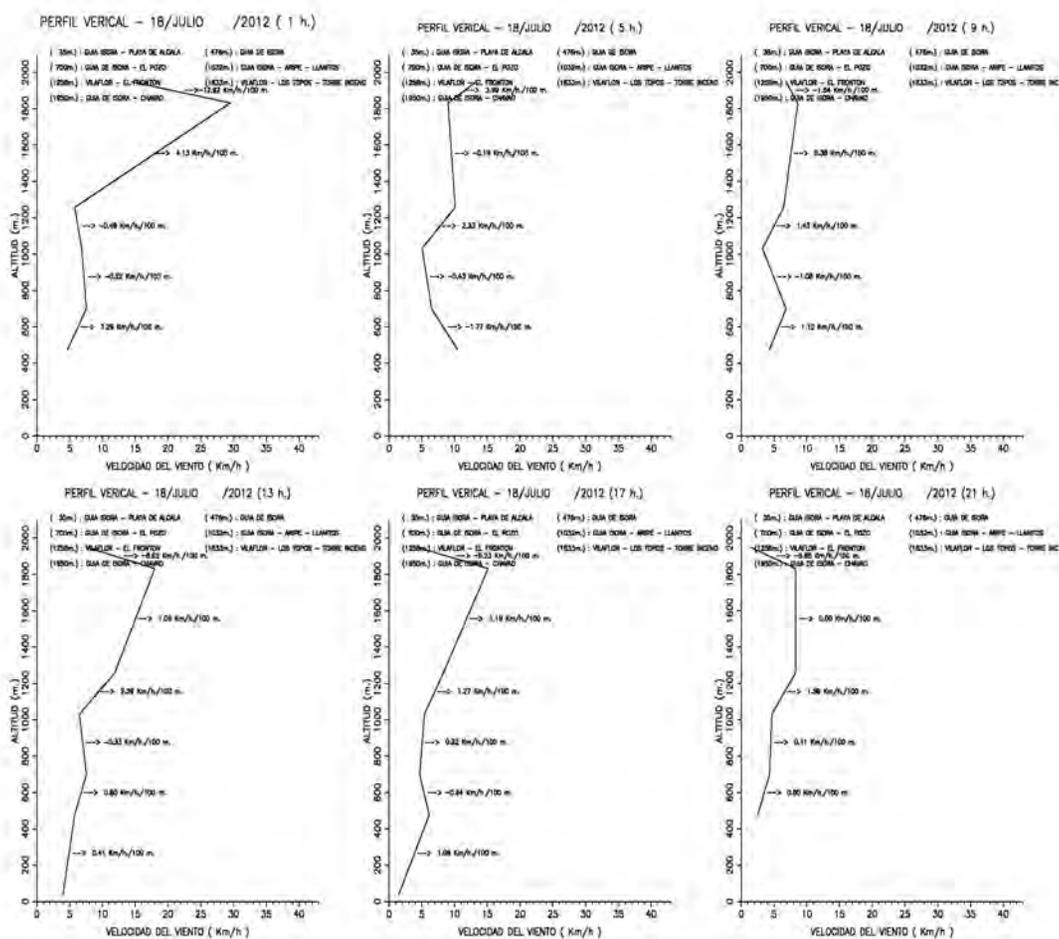
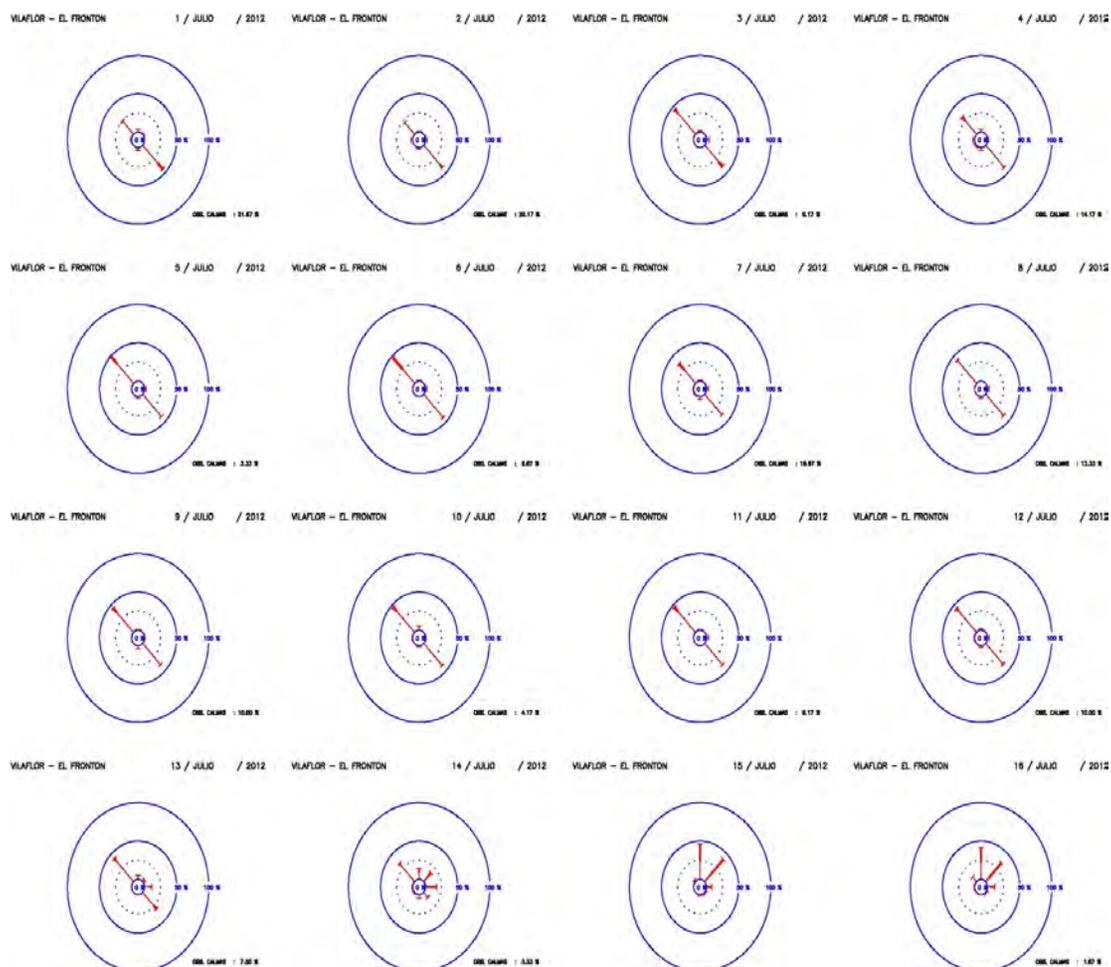


Figura 12: Perfil anemométrico vertical en un transecto de la comarca de ISORA el 18 de julio de 2012

En el periodo nocturno (horas posteriores a medianoche), la noche registra calma a vientos muy débiles en la costa y medianía baja, cotas inferiores a 480 m es ligero el ascenso anemométrico; la medianía baja y medianía alta registra vientos muy débiles a débiles, cotas comprendidas entre 480 m a 1260 m es ligero el ascenso anemométrico; la medianía alta a zona de montaña registra vientos débiles a fuertes, cotas comprendidas entre 1260 m a 1830 m, brusco ascenso anemométrico; la zona de alta montaña registra vientos fuertes a moderados, cotas superiores a 1830 m es notable el descenso anemométrico. En el periodo nocturno (madrugada), la noche registra calma a vientos moderados en la costa y medianía baja, cotas inferiores a 480 m es moderado el ascenso anemométrico; la medianía baja registra vientos moderados a débiles, cotas comprendidas entre 480 m y 1030 m es ligero el descenso anemométrico; la medianía alta a zona de montaña registra vientos débiles, cotas superiores a 1030 m es ligero ascenso anemométrico. En el periodo diurno (horas anteriores a mediodía), la mañana registra vientos en calma a vientos muy débiles en la costa a medianía baja, cotas inferiores a 480 m es ligero el ascenso anemométrico; la medianía baja a medianía alta registra vientos muy débiles a débiles, cotas comprendidas entre 480 m a 1030 m es ligero el ascenso anemométrico; la medianía alta a zona de montaña registra vientos débiles a moderados, cotas superiores a 1030 m es ligero el ascenso anemométrico. En el periodo diurno (horas posteriores a mediodía y comienzo de la tarde) registra vientos muy débiles a débiles en la costa y medianía alta, cotas inferiores a 1030 m es ligero el ascenso anemométrico; la medianía alta a zona de montaña registra viento débiles a moderados, cotas comprendidas entre 1030 m y 1830 m es moderado el ascenso anemométrico; la zona de montaña registra vientos moderados a muy débiles, cotas superiores a 1830 m es notable el descenso anemométrico. En el periodo nocturno (horas anteriores a medianoche) registra vientos en calma a muy débiles en la costa y medianía alta, cotas inferiores a 1030 m es ligero el ascenso anemométrico; la medianía alta a zona de montaña registra vientos muy débiles a débiles, cotas comprendidas entre 480 m y 1030 m es ligero ascenso anemométrico; la medianía alta y zona de montaña registra vientos débiles a muy débiles, cotas superiores a 1830 m es notable el descenso anemométrico. Las velocidades extremas en los periodos tetrahorarios son los siguientes: 0 Km/h / 29.5 Km/h (1 h), 0 Km/h / 13.3 Km/h (5 h), 0 Km/h / 8.6 Km/h (9 h), 4 Km/h / 18.9 Km/h (13 h), 1.4 Km/h / 15.1 Km/h (17 h), 0 Km/h / 8.3 Km/h (21 h).

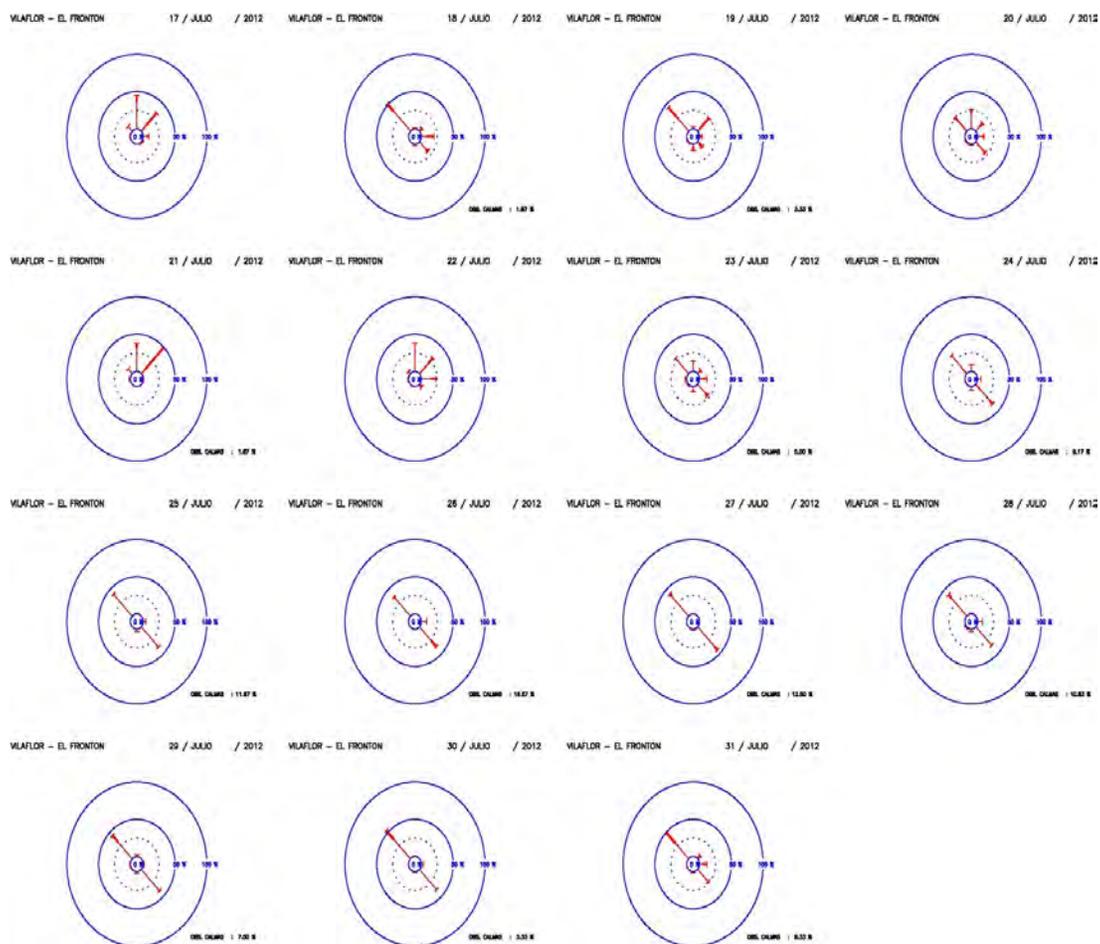
## **5. ROSAS DE VIENTO DIARIAS EN UNA ESTACIÓN METEOROLÓGICA PRÓXIMA A LA SUPERFICIE FORESTAL QUEMADA.**

Presentamos en Vilaflor – Los Frontones (1258 m) las rosas de viento diarias en el mes de julio que permiten mostrar las diferencias entre los regímenes de vientos diarios en los periodos previo y posterior en relación al periodo de incendio forestal. La colección muestran los contrastes en las velocidades y direcciones del viento entre días sin o con incendio.



**Figura 16:** Rosas de viento en la primera quincena de julio 2012 en VILAFLOL – El Frontón

En general las observaciones con velocidad de vientos, las rosas de vientos en los días previos al incendio forestal muestran vientos débiles que soplan en los sectores NW a N y E a S, en las direcciones NW y SE son frecuentes; los vientos moderados soplan en la direcciones NW y son poco frecuentes. Moderadas cantidades de observaciones de la velocidad del viento muestran situaciones de calma. La estación meteorológica El Frontón esta situada en la medianía alta vertiente sur, expuesta a vientos frescos y húmedos, vientos alisios. Efecto anabático / catabático del régimen de vientos diarios. Las velocidades medias y porcentajes de observaciones de viento en calma en los días previos, durante y posteriores al incendio forestal son: 6.3 km/h, 11.3 %, 9.2 km/h, 1.2 % y 6.8 km/h, 8.5 %. Las temperaturas medias en los días previos, durante y posteriores al incendio forestal son: 22 °C, 30.6 °C y 21.9 °C. Las humedades medias en los días previos, durante y posteriores al incendio forestal son: 38.6 %, 20.9 % y 42.9 %. En los días 15 y 16, los vientos débiles soplan en el sector NW a E y en la dirección N son frecuentes; los vientos moderados soplan en el sector N a NE y son frecuentes; aumenta la velocidad del viento y se retira el efecto anabático / catabático del régimen de vientos diarios.



**Figura 17:** Rosas de viento en la segunda quincena de julio 2012 en VILAFLORE – El Frontón

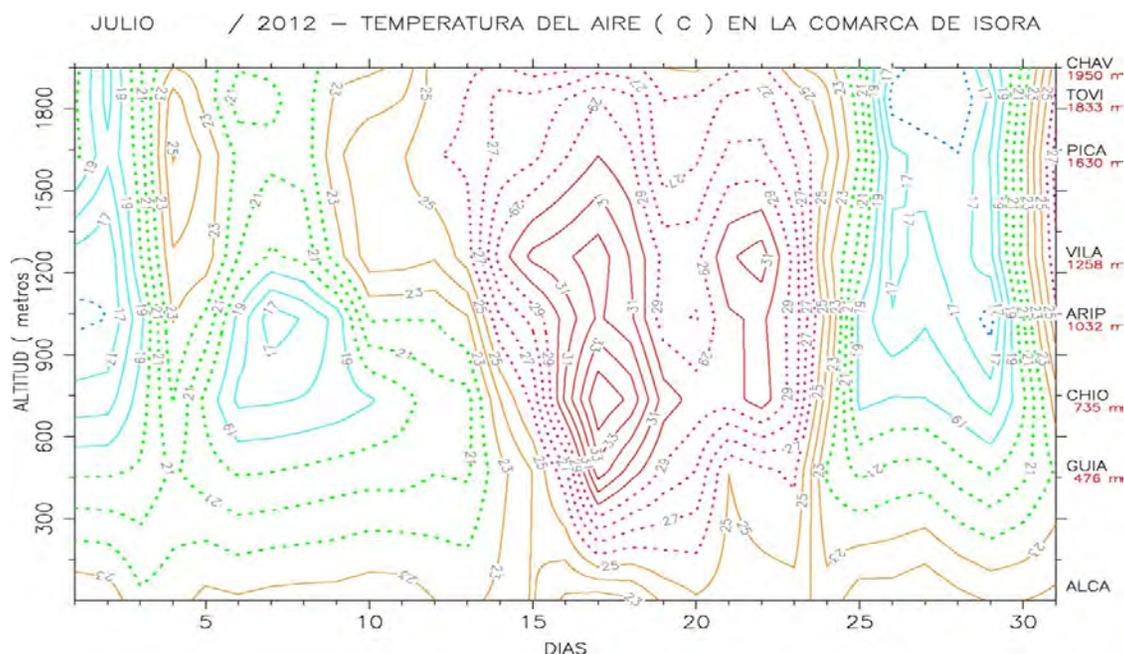
En general las rosas de vientos en los días durante el incendio forestal muestran vientos débiles que soplan en el sector NW a SE, en el sector N a NE son frecuentes; los vientos moderados soplan en el sector NW a NE y en la dirección NE son frecuentes; las rosas de vientos en los días posteriores al incendio forestal muestran vientos débiles que soplan en la dirección NW y en el sector E a SE, en las direcciones NW y SE son frecuentes; los vientos moderados soplan en las direcciones NW y SE y en la dirección NW son poco frecuentes. Se restablece el efecto anabático / catabático del régimen de vientos diarios. Los parámetros medios durante y posteriores al incendio forestal nos indican que la velocidad media del viento son débiles a moderadas, asciende moderadamente en los días del incendio; la temperatura media del aire diaria en los días del incendio es muy caliente y la humedad media del aire diaria es muy seca, y manifiestan variaciones relevantes en los periodos; la temperatura media, caliente y humedad media, semiseca en los días posteriores son notablemente inferiores y superiores en relación a los días del incendio forestal.

## 6. CONTORNOS ALTITUDINALES DE OBSERVACIONES METEOROLÓGICAS MEDIAS O ACUMULADAS DIARIAS EN LA COMARCA DE ISORA (OESTE).

¿Que es un contorno altitudinal de humedad del aire media mensual?

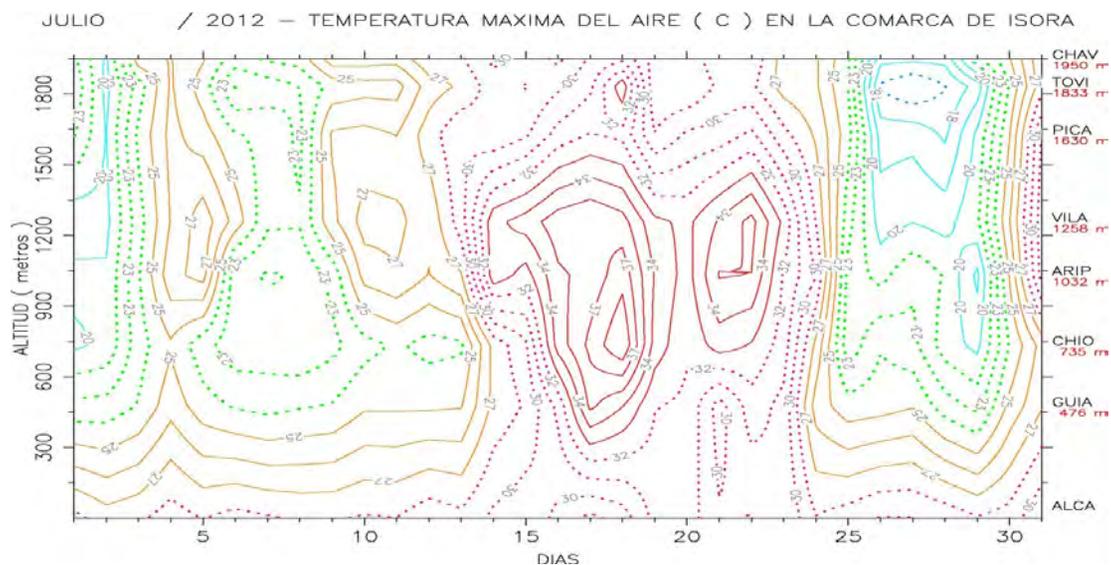
Un contorno es una línea que enlaza puntos de igual magnitud trazado sobre una superficie; en nuestro caso, un contorno es la línea higrométrica que une las humedades medias iguales en una superficie extensa. El trazado de los contornos se realiza por medio de un programa informático que analiza una retícula rectangular de observaciones, una matriz de observaciones.

La observación media horaria es el valor medio de las observaciones meteorológicas doceminutarias en la serie temporal termométrica, higrométrica o anemométrica para cada hora, valor medio de las observaciones registradas a las 0 min, 12 min, 24 min, 36 min y 48 min. Las filas están constituidas por n observaciones medias horarias. Un ejemplo, julio, las filas están constituidas por las humedades medias horarias de cada uno de los 31 días y las columnas están constituidas por las humedades medias horarias de cada una de las 24 horas de un día. Conocemos las observaciones medias entre dos horas consecutivas o las observaciones medias a una hora concreta entre dos días consecutivos, de manera un programa informático interpola una serie de observaciones medias y traza las isolíneas meteorológicas del contorno.



**Figura 18:** Contornos termométricos medios diarios en la comarca de Isora

La comarca de Isora ha sido afectada directamente por la actividad del incendio forestal. El trazado de los contornos contienen observaciones de las estaciones meteorológicas próximas a la superficie afectada por el incendio: Vilaflor y Los Picachos pertenecen a la comarca de Abona. Inversiones térmicas diarias intensas los días 15 al 19 en cotas superiores a 400 m, y los días 22 y 23 en cotas superiores a 700 m; inversiones térmicas diarias poco desarrolladas los días 20 y 21. En cotas próximas a la costa, cotas inferiores a 100 m, las temperaturas son inferiores a 24 °C. Durante los días de incendio, presencia de inversiones térmicas diarias. Los días previos al incendio, inexistencia de inversiones térmicas en cotas inferiores a 1400 m, las temperaturas descienden ligeramente entre 23 °C y 17 °C; inversiones térmicas diarias moderadas en cotas superiores, las temperaturas ascienden entre 18 °C y 23 °C. Los días posteriores al incendio, los días 25 al 30, inexistencia de inversiones térmicas en cotas inferiores a 2000 m, las temperaturas descienden suavemente entre 24 °C y 16 °C; el día 31, inversión térmica poco desarrollada en cotas superiores a 700 m.



**Figura 19:** Contornos termométricos máximos diarios en la comarca de Isora

Durante los días de incendio forestal, presencia de inversiones de temperaturas máximas diarias, inversiones térmicas diarias intensas los días 14 al 23 entre las cotas 300 m y 1500 m; inversiones térmicas diarias poco desarrolladas los días 4, 5, 6, 10 al 13 y 31. Los días previos al incendio, 1, 2, 3, 7, 8, 9 y días posteriores 25 al 31, inexistencias de inversiones térmicas diarias, las temperaturas máximas descienden entre 30 °C y 23 °C, y algunos días los descensos alcanzan temperaturas próximas a los 20 °C.

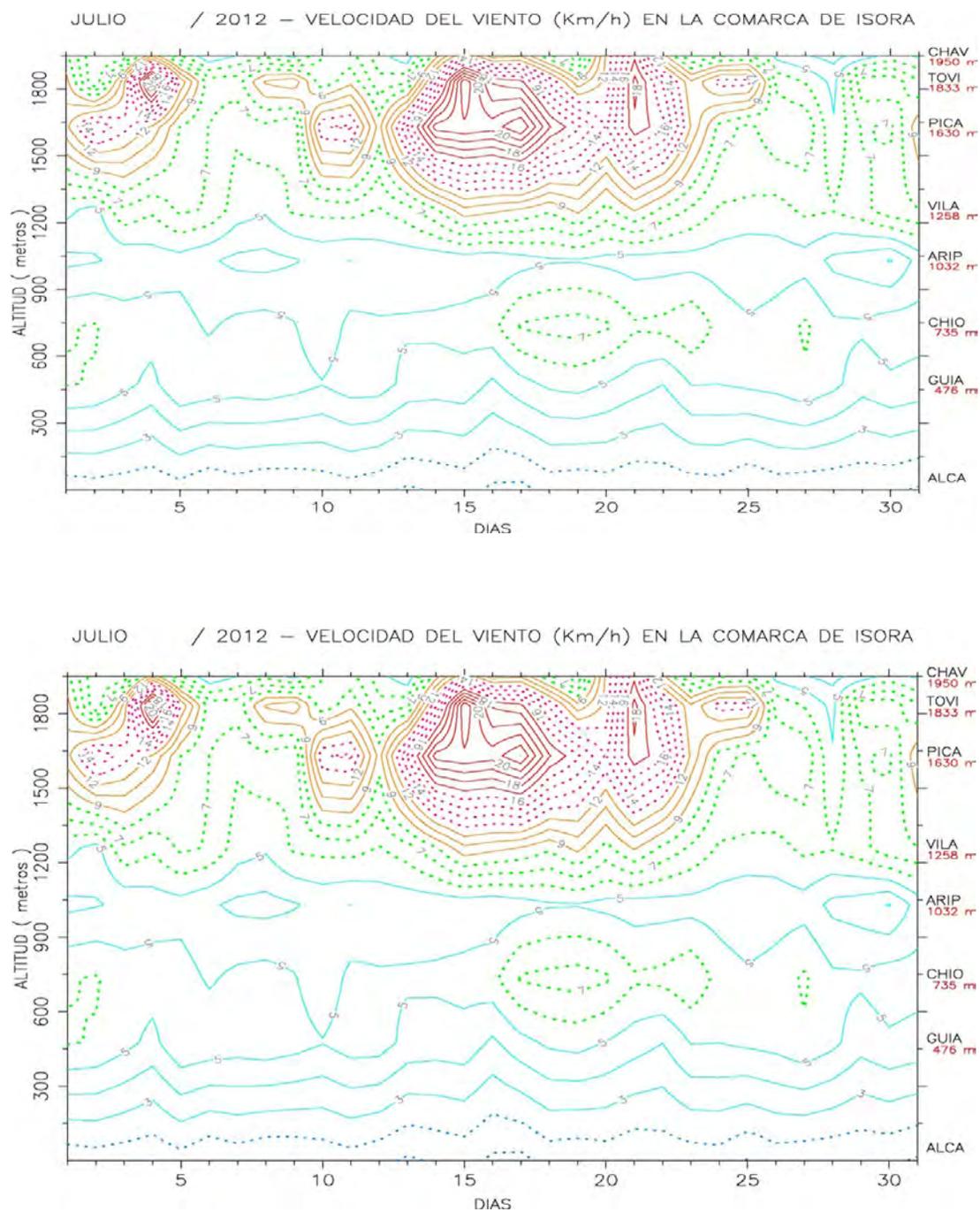
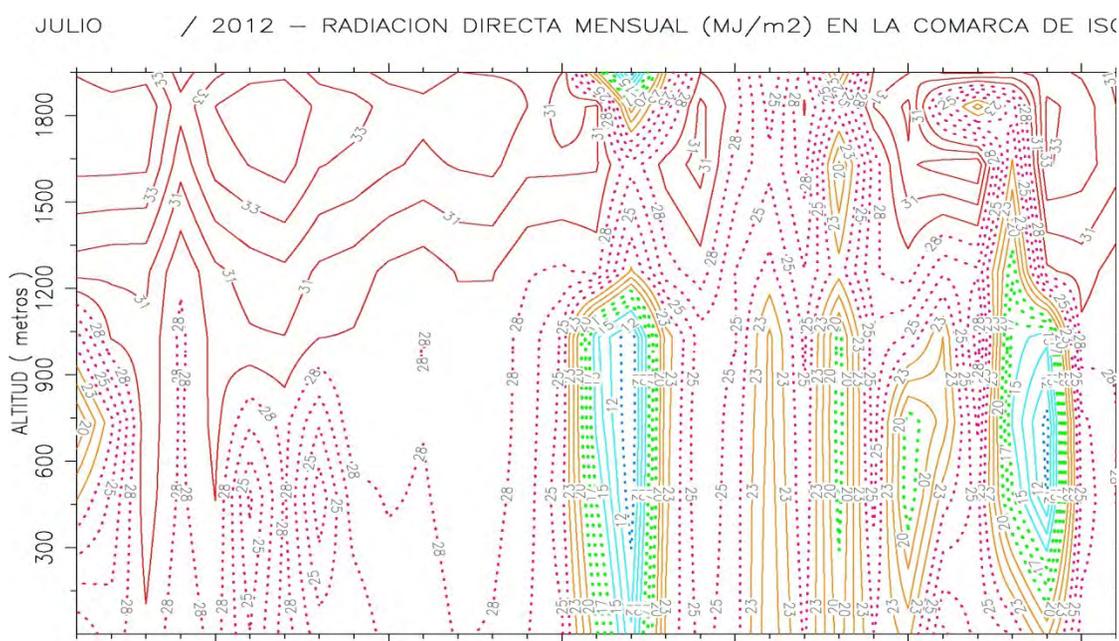


Figura 21: Contornos anemométricos medios diarios en la comarca de Isora

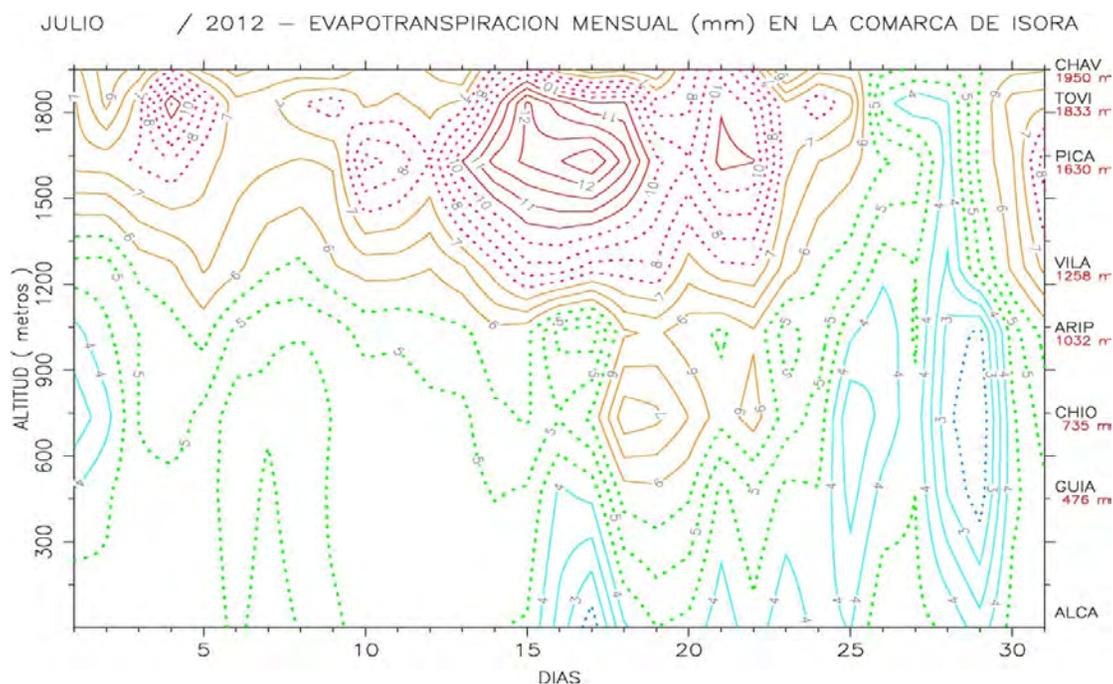
Los contornos indican las distribuciones altitudinales de las velocidades del viento medias diarias. Los vientos son muy débiles, velocidades inferiores a 5 km/m, en cotas inferiores a 1000 m, vientos que soplan frecuentemente en las direcciones NE y SW; muchas de las observaciones corresponden a vientos en calma. Durante los días de incendio, ascenso de la velocidad del viento en relación al aumento de altitud entre los días 14 y 22; brusco ascenso de la velocidad entre las cotas 1350 m y 1900 m, los días 14 al 19 se registraron velocidades medias comprendidas entre 14 km/h y 23 km/h, los vientos soplaron en el sector NE a SE. En algunos días previos y posteriores al incendio, cotas superiores a 1500 m, se registraron velocidades medias superiores a 14 km/h, los vientos soplaron en el sector NW a N, mientras que el resto de los días, las velocidades del viento son débiles, velocidades inferiores a 10 km/h.



**Figura 22:** Contornos de radiaciones solares directas diarias en la comarca de Isora

Los contornos indican las distribuciones altitudinales de las radiaciones solares directas acumuladas diariamente. Durante los días de incendio forestal, días 16 y 17, descenso brusco de la radiación solar debido a la humareda provocada por incendio, radiaciones solares comprendidas entre 9 MJ/m<sup>2</sup>.día y 16 MJ/m<sup>2</sup>.día, en cotas inferiores a 1100 m; la radiación solar es inferior a mayores altitudes en comparación a la radiación solar registrada en los días previos, la atmósfera esta contaminada por el humo, la radiación solar es absorbida por las partículas y no alcanzan la superficie terrestre. Los días previos al incendio, ascenso ligero de la radiación solar entre la costa y zona de montaña, 19 MJ/m<sup>2</sup>.día y 33 MJ/m<sup>2</sup>.día; las capas más bajas de la atmósfera registran menor radiación solar en comparación a las capas atmosféricas de montaña debido a la presencia de partículas contaminantes de origen natural o antropogénico. Los días posteriores al incendio, la radiación solar acumulada diaria es variable debido a la excesiva contaminación atmosférica y a la presencia de días húmedos, la

atmósfera tiene mayor contenido acuoso que provoca mayor absorción de radiación solar; algunos días presencia de neblinas en cotas inferiores a 1100 m.



**Figura 23:** Contornos de evapotranspiraciones Penman diarios en la comarca de Isora

Los contornos indican las distribuciones altitudinales de las evapotranspiraciones potenciales Penman diarias. La evapotranspiración es un factor climático que se estima por medio de expresiones matemáticas; la temperatura del aire, la radiación solar y la velocidad del viento son factores que inciden directamente, mientras que la humedad relativa del aire es un factor que incide inversamente en el cálculo de la evapotranspiración. Durante los días de incendio forestal, entre los días 16 y 22, ascenso moderado de la evapotranspiración diaria debido a las condiciones meteorológicas adversas causadas por incendio, evapotranspiraciones diarias comprendidas entre 3 mm y 12 mm; la evapotranspiración es muy elevada entre las cotas 1400 m a 1900 m, humedad del aire excesivamente baja, temperatura del aire muy caliente, vientos moderados a fuertes y radiación solar moderada a alta. Los días previos al incendio, la evapotranspiración es baja, inferior a 5 mm en cotas inferiores a 1050 m, la evapotranspiración diaria asciende ligeramente al aumentar la altitud, entre 5 mm y 10 mm, evapotranspiración baja a moderada. Los días posteriores al incendio, la estimación de la evapotranspiración está afectada por los factores ambientales, atmósfera húmeda y contaminada, vientos débiles y cielos cubiertos, las evapotranspiraciones diarias adquieren valores menores, 3 mm a 6 mm.

## 7. CONCLUSIÓN

El fuego comenzó el 15 de julio a las 15:00 horas en una zona de huertas de Vilaflor y como consecuencia del avance de las llamas han sido desalojadas varias casas de los núcleos de Ifonche, La Quinta, Taucho y Vilaflor. El fuego, afecta a una zona de pinar y monte bajo del sur del Tenerife. El fuego se considera oficialmente controlado el 21 de julio. La zona afectada 2800 hectáreas: medianías altas y zona de montaña (límite con en Parque Nacional del Teide) SSE a SSW entre las cotas 900 m a 2100 m

El estudio climático de los efectos del incendio forestal en las comarcas de Isora y Abona se realiza a partir de las observaciones doceminutarias registradas en las estaciones meteorológicas automáticas de Agrocabildo. Las estaciones elegidas son situadas en diferentes cotas sobre una línea imaginaria, transepto altitudinal que muestra las diferentes variaciones de las observaciones meteorológicas en la vertiente SSE a W de Tenerife. Las estaciones en el transepto son las siguientes: Playa Alcalá (35 m), Guía de Isora (476 m), Chío (700 m), Aripe (1032 m), Vilaflor - El Frontón (1258 m), Vilaflor - Los Topos (1833 m) y Guía de Isora - Chavao (1950 m).

Las situaciones barométricas en la superficie terrestre días previos, durante y posteriores al incendio forestal:

- Días previos indican altas presiones sobre el Atlántico Oriental (1033 mb) centradas en las Azores y presencia de bajas presiones sobre el Sahara Occidental, soplan los vientos alisios moderados a fuertes en las islas Canarias; descenso uniforme de las temperaturas hasta 600 m, varias inversiones térmicas de grosores inferiores a 200 m, ascensos de temperaturas superiores a 2 °C/100 m.
- Durante indican altas presiones sobre el Atlántico Oriental (1031 mb) centradas en las Azores y presencia de bajas presiones sobre el Sahara Occidental, soplan los vientos alisios muy débiles a moderados en las islas; ligero descenso de la temperatura hasta 200 m, notable ascenso de las temperaturas hasta 500 m, inversión térmica, descenso suave de la temperatura hasta 3000 m; vientos débiles y vientos moderados soplan en el sector N a NE en cotas comprendidas entre los 200 m y 2000 m; inversión térmica notable entre 200 m y 500 m, ascenso de temperaturas de 23 °C a 33.6 °C, aproximadamente 3.5 °C/100 m.
- Días posteriores indican altas presiones poco intensas en el Atlántico Central y Oriental (1024 mb) centradas a una latitud similar al estrecho de Gibraltar, bajas presiones centradas en la península Ibérica y sureste de Marruecos, soplan vientos alisios moderados en las islas; notable descenso de la temperatura hasta 650 m; capa atmosférica con una amplia inversión térmica hasta 1250 m, ascensos de temperaturas superiores a 1.5 °C/100 m, descenso suave de la temperatura hasta 3000 m.

Régimen de vientos diarios en la costa, medianía baja, medianía alta y zona de montaña de la comarca Isora días previos, durante y posteriores al incendio forestal:

- En la costa, días previos, las rosas de vientos muestran vientos muy débiles que soplan en el sector SE a W, en la dirección S son frecuentes y en la dirección SW son dominantes; muchas observaciones de la velocidad del viento muestran situación de calma. Durante, los vientos muy débiles soplan en el sector SE a NW, en la dirección SW son frecuentes y en la dirección S son dominantes; muchas observaciones de la velocidad del viento muestran situación de calma. Días posteriores, la velocidad media del viento es poco relevante e incluso desciende en los días del incendio.
- En la medianía baja, días previos, las rosas de vientos muestran vientos débiles que soplan en los sectores NW a N y SE a S, en las direcciones NW y SE son frecuentes; los vientos moderados soplan en las direcciones NW y SE y son poco frecuentes; efecto anabático / catabático. Durante, los vientos débiles soplan en el sector NW a SE, en la dirección N son frecuentes; los vientos moderados soplan en el sector NW a NE y en la dirección NE son frecuentes; efecto anabático /catabático no es relevante. Días posteriores, los vientos débiles soplan en los sectores NW a S, en las direcciones NW y SE son frecuentes; los vientos moderados soplan en las direcciones NW y SE y son poco frecuentes; se restablece el efecto anabático / catabático.
- En la medianía alta, días previos, las rosas de vientos muestran vientos débiles que soplan en los sectores NW a N y E a S, en las direcciones NW y SE son frecuentes; los vientos moderados soplan en las direcciones NW y son poco frecuentes; moderadas cantidades de observaciones de la velocidad del viento muestran situaciones de calma; efecto anabático / catabático. Durante, los vientos débiles soplan en el sector NW a SE, en el sector N a NE son frecuentes; los vientos moderados soplan en el sector NW a NE y en la dirección NE son frecuentes; el efecto anabático /catabático no es relevante. Días posteriores, los vientos débiles soplan en la dirección NW y en el sector E a SE, en las direcciones NW y SE son frecuentes; los vientos moderados soplan en las direcciones NW y SE y en la dirección NW son poco frecuentes; se restablece el efecto anabático / catabático.
- En la zona de montaña, días previos las rosas de vientos muestran vientos débiles que soplan en el sector E a N y en la dirección SW son frecuentes; los vientos moderados soplan en el sector SW a N y en la dirección W son frecuentes; escasas cantidades de observaciones de la velocidad del viento muestran situaciones de calma; el efecto anabático / catabático no se verifica diariamente. Durante, los vientos débiles soplan en el sector N a SE y son poco frecuentes; los vientos moderados soplan en el sector NE a W, y algunos días en la dirección SW son frecuentes; los vientos fuertes soplan en el sector N a SE, y algunos días en la dirección NE son frecuentes; el efecto anabático / catabático no es relevante. Días posteriores, los vientos débiles soplan en todas las direcciones y en la dirección E son frecuentes; los vientos moderados soplan en el sector

N a W y en la dirección SW son frecuentes; los vientos fuertes, algunos días, soplan en el sector en a SE; se restablece de manera irregular el efecto anabático / catabático.

Los parámetros medios durante y posteriores al incendio forestal nos indican que la velocidades medias del viento son débiles a fuertes, ascienden notablemente en los días del incendio forestal.

Comportamiento de parámetros meteorológicos en la comarca de Isora en los días previos, durante y posteriores al incendio de forestal:

- Las temperaturas medias diarias durante el incendio presentan inversiones térmicas diarias intensas, los días 15 al 19 en cotas superiores a 400 m, y los días 22 y 23 en cotas superiores a 700 m, ascenso notable de la temperatura del aire, Los días previos presentan inexistencia de inversiones térmicas en cotas inferiores a 1400 m, inversiones térmicas diarias moderadas en cotas superiores. Los días posteriores presentan inexistencia de inversiones térmicas en cotas inferiores a 2000 m, las temperaturas descienden suavemente.
- Las temperaturas máximas medias diarias durante el incendio presentan inversiones de temperaturas intensas, los días 14 al 23 entre las cotas 300 m y 1500 m. Los días previos, muchos presentan inexistencias de inversiones térmicas. Los días posteriores 25 a 31 inexistencias de inversiones térmicas, las temperaturas descienden entre 30 °C y 23 °C, y algunos días los descensos alcanzan temperaturas próximas a los 20 °C.
- Las humedades medias diarias durante el incendio inexistencias de inversiones higrométricas, descenso brusco de la humedad del aire, entre 72 % y 15 %, en cotas inferiores a 2000 m. Los días previos y días posteriores presentan existencias de inversiones higrométricas diarias poco desarrolladas entre las cotas 400 m y 750 m debido a la actividad de los vientos alisios.
- Las velocidades del viento medias diarias durante el incendio ascenso de la velocidad en relación al aumento de altitud entre los días 14 y 22; brusco ascenso de la velocidad entre las cotas 1350 m y 1900 m, los días 14 al 19, velocidades medias diarias comprendidas entre 14 km/h y 23 km/h, los vientos secos soplaron en el sector NE a SE. Muchos días previos y posteriores las velocidades del viento son débiles, velocidades inferiores a 10 km/h. Todos los días, los vientos son muy débiles en cotas inferiores a 1000 m, vientos que soplan frecuentemente en las direcciones NE y SW; muchas de las observaciones corresponden a vientos en calma.

La radiación solar directa acumulada diaria durante el incendio desciende bruscamente debido a la humareda provocada por incendio en cotas inferiores a 1100 m; la radiación solar es inferior a mayores altitudes en comparación a la radiación solar registrada en los días previos, la atmósfera esta contaminada por el humo. Los días previos ascenso ligero de la radiación solar al aumentar la altitud. Los días posteriores la radiación solar es variable debido a la

excesiva contaminación atmosférica y a la presencia de algunos días húmedos; presencia de neblinas en cotas inferiores a 1100 m.

- La evapotranspiración potencial Penman acumulada diaria durante el incendio asciende notablemente, 3 mm y 12 mm, debido a las condiciones meteorológicas adversas. La evapotranspiración es muy elevada entre las cotas 1400 m a 1900 m, humedad del aire excesivamente baja, temperatura del aire muy caliente, vientos moderados a fuertes y radiación solar moderada a alta. Los días previos la evapotranspiración es baja en cotas inferiores a 1050 m, ETP inferiores a 5 mm, la evapotranspiración diaria asciende ligeramente al aumentar la altitud, 5 mm y 10 mm. Los días posteriores la estimación de la evapotranspiración está afectada por los factores ambientales, atmósfera húmeda y contaminada, vientos débiles y cielos cubiertos, las ETP diarias adquieren valores menores, 3 mm a 6 mm.

Los días de julio las islas Canarias están bajo la influencia de un anticiclón atlántico. Durante los días del incendio forestal el anticiclón es intenso, inversiones de temperaturas muy acusada entre las cotas 200 m a 500 m y descensos suaves de temperaturas hasta los 3300 m. Las condiciones ambientales en las superficies afectadas por el fuego, cotas superiores a los 700 m, cambian notablemente en comparación con las superficies de otras vertientes a altitudes similares: la temperatura de aire aumenta notablemente, la humedad del aire desciende espectacularmente, la velocidad del viento aumenta moderadamente y los días de fuego las velocidades son moderadas a fuertes, la radiación solar directa desciende por la acción de la contaminación y la evapotranspiración aumenta notablemente.

La presencia de incendio en los montes causa las condiciones ambientales más adecuadas para la óptima propagación del fuego.

#### **REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA**

Información meteorológica extraída de la red meteorológica del Cabildo de Tenerife à Agrocabildo  
[www.agrocabildo.es](http://www.agrocabildo.es)

*Imágenes extraídas en internet:*

Satélite Meteosat 9 Universidad de Dundee

Satélite Meteosat 9 Instituto Astrofísica de Canarias

Archivo de mapas sinópticos de Meteorología Suecia

Sondeos de la estación Güimar – Tenerife facilitados por la Universidad de Wyoming







## AVANCES EN LA INVESTIGACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN ISLAS Y TERRENOS VOLCÁNICOS

Canarias se puede considerar como uno de los mejores laboratorios hidrogeológicos del mundo. Por una parte, en la isla coexiste un amplísimo abanico de procesos volcánicos, desde aquellos asociados a materiales muy básicos a otros asociados a materiales muy diferenciados, todo ello en un área de apenas 2.000 km<sup>2</sup>, algo insólito en una región volcánicamente activa. Por otro lado, las islas cuentan con una amplísima red de galerías subterráneas y pozos, que permiten estudiar desde el subsuelo prácticamente cualquier fenómeno geológico presente en la isla. Esta red de extracción de aguas subterráneas permite además acceder al acuífero a distintas alturas, latitudes y longitudes, hecho que también es insólito a nivel mundial. Las galerías y pozos constituyen el principal sistema de abastecimiento de agua para la población, por lo que existe un claro vínculo social y económico con el agua subterránea.

El presente libro, incluye las lecturas de la reunión científica que tuvo lugar en la isla de Tenerife durante el mes de Noviembre 2012, en ella participaron científicos y profesionales de todo el país participando en las siguientes sesiones en las que se divide el presente documento;

- El agua en los terrenos volcánicos, tecnologías de aprovechamiento
- Estudio de los recursos hídricos subterráneos
- Obras hidráulicas y aprovechamientos superficiales
- Nuevas tecnologías, depuración y calidad de aguas
- Gestión integral del agua e hidrología forestal

El libro es de interés para académicos, ingenieros, consultores, y profesionales vinculados con la hidrología y el aprovechamiento de aguas en terrenos volcánicos.



ISBN 978-84-616-3860-4



9 788461 638604 >