

Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias

M. Victoria Marzol Jaén & Jonás Trujillo García · M. Pilar García Alonso
Jaime J. González Gonzálvez · Óscar Monterroso-Hoyos et al. · Luisa Vera

Aqua

Reflexiones para una gestión eficaz



Actas XIV Semana Científica Telesforo Bravo

Aqua

Reflexiones para una gestión eficaz

Editado
por
Julio Afonso-Carrillo

Actas XIV Semana Científica Telesforo Bravo
INSTITUTO DE ESTUDIOS HISPÁNICOS DE CANARIAS
2019

© Los autores

© De esta edición: 2019, Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias,
C/. Quintana, 18. Puerto de la Cruz, Tenerife,
Islas Canarias, E-38400.
www.iehcan.com

Diseño de la cubierta:
:rec retoque estudio creativo
www.retoqueec.com

Primera edición: octubre 2019

Imprime:
Litografía La Palma
C/ El Galión 18 - 38700 Santa Cruz de La Palma
CIF: B38340501

Depósito Legal: TF 867-2019

ISBN: 978-84-09-15374-9

Presentación

En la casa tradicional canaria ocupaba un lugar destacado un notable y típico filtro que ponía a disposición de sus moradores agua potable y fresca, la destiladera. Sus dos cuerpos agrupados en un mueble de celosías de madera, estaban bordeados por culantrillos que realzaban la fresca atmósfera de su interior. Arriba la piedra filtrante de arenisca o de lava porosa, hemisférica y ahuecada, donde se depositaba el agua que luego filtraba gota a gota hacia la tinaja de barro cocido, bernegal o talla, situada debajo. La destiladera, paradigma de las aguas subterráneas canarias, nos enlaza con el ciclo del agua, además de suponer una evidencia de la capacidad creativa que permitió resolver un problema utilizando el conocimiento y la identificación adecuada de los recursos del entorno cercano. Representa uno de los numerosos ejemplos del conocimiento empírico acopiado por un pueblo para aprovechar el agua en un territorio sediento.

Es incuestionable que agua y vida van de la mano. El agua es el componente primordial de todas las formas de vida conocidas. Aunque tres cuartas partes de la superficie de la Tierra están ocupadas por el agua de océanos, ríos, hielos polares y glaciares, debemos proclamar que necesitamos el agua. Técnicamente suele ser caracterizada como un bien renovable de naturaleza ilimitada, sin embargo, cuando nos referimos al agua que necesitamos, al agua potable, la del abastecimiento a la población para su uso cotidiano o para llevar a cabo diferentes actividades económicas, nos encontramos con que este recurso, de vital importancia socio-cultural, es calificado como un bien escaso a nivel global.

El agua de la Tierra fluye en un ciclo que ha propiciado la existencia de la vida. Es el ciclo del agua. El agua de los océanos se evapora y pasa a la atmósfera, donde la circulación atmosférica reparte de manera desigual las nubes y el vapor de agua por todo el planeta. Cuando el vapor de agua se

condensa, cae en forma de lluvia, nieve o granizo. Así, desde que una gota de agua deja el océano hasta que regresa a él, pueden llegar a pasar miles de años. Los seres vivos se sirven del agua y luego el agua de los organismos es devuelta a la naturaleza como desechos o al morir. De este modo, el agua que ahora forma parte de nuestro cuerpo, fue previamente parte de otros muchos seres vivos.

El **ciclo del agua** se puede resumir en diferentes etapas. En la atmósfera el agua asciende desde los océanos por *evaporación* y desciende sobre los continentes como *precipitación*. Pero no toda el agua de las precipitaciones llega a la superficie, puesto que una parte se evapora durante la caída y otra es retenida (*interceptación*) por la vegetación o por cualquier estructura, antes de volver nuevamente a la atmósfera por *evaporación*. Parte del agua de precipitación que llega a la superficie del terreno es retenida en charcos antes de evaporarse en su mayor parte. Otra porción de la precipitación circula por gravedad por la superficie constituyendo la *escorrentía superficial* (acaba en torrentes, ríos, lagos o en el mar). Y una última fracción del agua de lluvia es la que se *infiltbra* en el terreno a través de los poros o grietas del mismo y desciende por gravedad. Parte de esta agua puede sufrir evaporación o bien puede ser transpirada por las plantas desde el suelo edáfico (*evapotranspiración*), mientras que otra sigue descendiendo por gravedad hasta alcanzar a una zona saturada de agua. De esta manera pasa como *recarga* a formar parte del *agua subterránea*, que se va desplazando hacia los lugares en los que *descarga* a la superficie como manantiales o nacientes. La cuantificación de estos diferentes apartados permite establecer lo que se conoce como balance hídrico. Las actividades desarrolladas por el hombre intervienen en este ciclo natural. De modo que debería hacerlo de forma sensata para no provocar graves desequilibrios. Sin embargo, desgraciadamente esto no es así.

La búsqueda de un modelo sostenible de explotación de los recursos hídricos ha conducido al diseño del denominado **ciclo integral del agua**, proceso que concentra las diferentes etapas de intervención humana en su gestión. Abarca desde que el recurso se capta y llega al grifo, hasta que, una vez usado, se devuelve a la naturaleza o se reutiliza. El ciclo tiene tres fases: abastecimiento, saneamiento y reutilización. Se ha tenido que desarrollar un proceso, minuciosamente regulado, en el que el agua se transporta desde su origen a las áreas urbanas y se potabiliza para asegurar las adecuadas condiciones sanitarias, se almacena en depósitos urbanos y se conduce por tuberías en complejas redes hasta llegar a las acometidas y contadores de los edificios. Después, las aguas urbanas una vez usadas se recogen, de manera conjunta o separada de las aguas de lluvia, a través de tuberías de la red de saneamiento para su transporte hacia los sistemas de depuración en complejas y tecnificadas infraestructuras dotadas con

procesos físicos, químicos y biológicos, para luego reutilizarlas o verterlas en condiciones de respeto al medio ambiente. La reutilización en usos distintos al consumo humano (iego de jardines, producción agrícola, usos industriales,...), supone la regeneración de este recurso escaso.

Si nos centramos en el Archipiélago Canario, hay que recalcar que ningún paisaje, y Canarias no es una excepción, se puede concebir si se suprime el papel del agua. Es el elemento clave. El agua es la que modela el relieve, actuando en los territorios volcánicos recién creados tras una erupción esculpiendo valles y barrancos, descubriendo diques, acumulando sedimentos, etc. Además, en el paisaje ya ocupado por el hombre, el agua es el bien insustituible al que diariamente se tiene que recurrir. La vida gira obligatoriamente alrededor del agua. La individual y la colectiva. Y en islas volcánicas como Canarias con particulares características relacionadas con sus singularidades geológicas y climáticas y a la herencia socio-cultural de sus habitantes.

Aunque por su latitud a Canarias le corresponde un clima seco y cálido, los vientos alisios confieren a las islas su peculiaridad. Así, el clima varía con la altitud de las islas, al permitir la formación de nubes. Las islas más bajas (Fuerteventura y Lanzarote) son islas secas, mientras que las de altura media (La Gomera y El Hierro) y las altas (Gran Canaria, Tenerife y La Palma) contienen áreas subhúmedas limitadas. Las precipitaciones medias oscilan entre los 111 mm/año de Fuerteventura y los 740 mm/año de La Palma, aunque dentro de cada isla las variaciones climáticas pueden ser muy importantes. Aún cuando en el pasado hubo pequeños cursos de agua permanente, ahora son excepcionales el Barranco de Las Angustias en La Palma y el Barranco de El Cedro en La Gomera. No obstante, los barrancos funcionan de manera esporádica, de tal modo que a las ocasionales avenidas torrenciales, suceden nuevos períodos secos.

Es bien conocido que una isla volcánica suele estar constituida por la acumulación de materiales volcánicos procedentes de diferentes erupciones. Ya sea mediante coladas de lava dispuestas directamente unas sobre otras, o bien por una alternancia de piroclastos y coladas lávicas. Los diques son las discontinuidades verticales o inclinadas más importantes y frecuentes. De manera que los movimientos del agua subterránea pueden estar muy condicionados por las intercalaciones y los diques. Estos últimos son los conductos de alimentación de las erupciones volcánicas, y por tanto las rocas que los conforman suelen presentar una textura mucho más compacta. Por norma general son muy densos y compactos, pero a veces presentan grietas de retracción perpendiculares a las paredes, de tal manera que su papel con respecto a la circulación del agua puede ser el de barrera impermeable o el de camino preferente de flujo. Habitualmente, en la isla volcánica los materiales más permeables suelen estar en superficie como consecuencia del tipo de volcanismo que los ha originado y a su mayor

juventud, mientras que los menos permeables se sitúan en profundidad, como los complejos basales, los materiales más antiguos y las zonas fuertemente inyectadas de diques.

Indudablemente, todas las formaciones geológicas contienen agua en diferente grado, que ocupa los poros, grietas y fisuras del terreno. En los medios que están saturados, los poros pueden estar totalmente llenos de agua, mientras que en los no saturados, parte de los poros están ocupados por aire. De manera que un acuífero sería aquella formación geológica que permite la circulación del agua por sus poros y grietas hacia otras partes del territorio y hacia las descargas naturales. Las rocas volcánicas configuran territorios en los que se apilan materiales diversos que van desde los muy compactos hasta aquellos con una porosidad que puede superar el 50%.

Aunque el poblamiento de Canarias se estima que ocurrió unos mil años antes de nuestra era, tenemos información fiable tan solo en lo referente a las poblaciones aborígenes que tuvieron la posibilidad conocer los europeos. Así, los primeros colonizadores encontraron un conjunto de islas cubiertas por importantes masas boscosas, que no solo facilitaban la infiltración, sino que además captaban la humedad de los alisios, de manera que los acuíferos insulares es muy probable que se colmataran con regularidad. Las islas estaban surtidas de innumerables fuentes que originaban caudales importantes de manera permanente. En esta situación más húmeda la abundancia de nacientes dotaba de agua durante todo el año a una gran parte de barrancos, y consecuentemente, esta era aprovechable por los aborígenes. Estos se distribuían por los territorios insulares principalmente en función de la disponibilidad de agua, y de su propia capacidad para recogerla y almacenarla. Aunque dependían de la ganadería y de una agricultura que se limitaba a unas pocas especies cultivables, solo en Gran Canaria los aborígenes desarrollaron lo que es posible calificar como incipientes sistemas de regadío.

De manera que la disponibilidad de agua determinó los asentamientos aborígenes, que recurrián a una serie de métodos para proveerse de ella tanto durante los períodos en los que era abundante como durante las pertinentes sequías. Cuando se aproximaba el verano y las fuentes se mermaban o secaban, debían recurrir a sistemas de almacenaje y, muy posiblemente, restricciones, hasta que retornara la lluvia. Se las ingenieraron mediante piletas en riscos, eres, muros de piedra en las barranqueras, acequias, albercones, e incluso con cuevas filtrantes donde se captaba y distribuía el agua en función de sus necesidades. Pero siempre con una clara dependencia de las vicisitudes del clima. Sin duda debieron padecer las consecuencias de la irregularidad en las precipitaciones que provocarían períodos de sequía que afectarían gravemente a su sustento. El agua resultaba tan vital para la supervivencia, que la inmensa mayoría de sus creencias mágico-religiosas estaban orientadas a conseguir que sus dioses

les favoreciesen con las lluvias. El ritmo de sus vidas dependía en última instancia de la abundancia o escasez de agua, lo cual se traducía en alimentos o en hambrunas. En El Hierro, los bimbaches tenían al garoé como árbol sagrado. La ubicación de este til en el recorrido de las nieblas permitía a sus hojas condensar las gotitas de agua que precipitaban hacia oquedades situadas alrededor del árbol, siendo la principal fuente de agua de este pueblo.

Una vez finalizada la conquista, se inició el proceso de explotación de los nuevos territorios. Los nacientes quedaron bajo el control de los conquistadores castellanos y principalmente de los genoveses y flamencos que habían intervenido financiando la conquista. En aquellos momentos Europa demandaba azúcar y las islas reunían las condiciones tanto climáticas como de disponibilidad de agua imprescindibles para que prosperara el cultivo de la caña. Es así como los cañaverales de caña dulce se extendieron por las zonas bajas de aquellas islas que contaban con suficientes recursos hídricos para asegurar el riego y el funcionamiento de los ingenios. Durante siglo y medio el cultivo de la caña posibilitó el desarrollo de una red de canales y de acequias para llevar el agua hasta los cultivos. En los primeros repartimientos, el agua que nacía desde las cumbres quedó vinculada a las tierras bajas. Surgieron así los *heredamientos* que permitieron a los nuevos propietarios de tierras e ingenios la progresiva privatización de los recursos hídricos.

Los primeros maestros del agua fueron traídos desde la vecina Madeira, aprovechando la experiencia que los portugueses habían desarrollado tanto en Madeira como en Azores, territorios volcánicos con similitudes con Canarias. Se comenzaron a construir acequias, canales, tanques y albercas para el trasvase del agua, y los primeros ingenios tanto para elevar el agua (norias), como para aprovechar su energía en los saltos (molinos de agua y batanes). Los resultados fueron tan satisfactorios que entre los siglos XVI y XVIII, muchas de las estrategias hidráulicas desarrolladas en Canarias para la captación, conducción y gestión del agua fueron llevadas a América.

De modo que con estas primeras infraestructuras los caudales se conducían a las plantaciones de caña con sus ingenios, a los sembrados de grano y hortalizas, a los poblados próximos y a los molinos de agua. Durante este periodo y de forma simultánea tuvo lugar una significativa reducción de la masa forestal como consecuencia del elevado consumo de leña de los ingenios azucareros, así como de la tala de pinos tanto para la construcción como para la elaboración de la brea. De manera que tras la colonización poco a poco las aguas de los nacientes dejaron de correr libremente por los barrancos, y la merma de los bosques facilitó la erosión, al tiempo que la precipitación por condensación y la infiltración se redujeron considerablemente.

Cuando finalizó el ciclo del azúcar, la desaparición de los cañaverales se tradujo en una importante reducción de la demanda de agua, puesto que fueron reemplazados por viñas, mucho menos exigentes en agua. Sin embargo, a finales del siglo XIX la demanda de agua se disparó con los nuevos cultivos de regadío, principalmente plátanos y tomates. La superficie cultivada de las zonas bajas de las islas se fue incrementando paulatinamente, junto con la consecuente demanda de agua que hizo insuficiente los caudales de los nacientes. Se necesitaba agua, y se buscaba donde fuera, bien en el subsuelo, o tratando de atrapar y almacenar la procedente de la lluvia. Se estaban dando los primeros pasos que conducirían al decisivo periodo dedicado al alumbramiento de aguas subterráneas mediante pozos y galerías. Aguas para regar los campos y aguas para el abastecimiento urbano. A las ciudades se conducía el agua para abastecer las fuentes y chorros públicos que en muchas comarcas se mantuvieron en uso hasta superada la mitad del siglo XX. Después comenzaría a extenderse una incipiente red de conducciones que llevaría el agua hasta las casas, al tiempo que fuentes y chorros públicos quedaron solo para el abastecimiento de las clases más humildes.

La tecnología hidráulica inició su desarrollo, y se perforaron miles de galerías y de pozos, con la ayuda de la moderna maquinaria de la época, al tiempo que se construyeron todo tipo de estanques, presas y canales, con capital tanto privado como público. Las galerías de agua se planificaron inicialmente por intuición, excavando en aquellos manantiales que vertían caudales insuficientes con la esperanza de alcanzar caudales mayores. Fueron planeadas y llevadas a cabo por la iniciativa privada, lo que ha conducido a la actual situación con respecto a los mercados del agua y la planificación hidrológica insular de las islas con aguas de galerías. La propiedad del agua y su gestión también sufrió variación y las antiguas heredades se fueron transformando en comunidades de regantes, y a lo largo del siglo XX el mercado del agua alcanzó la actual configuración.

Es así como el agua subterránea canaria es hoy un recurso de propiedad privada comercializada según el sistema de mercado, y que algunos valoran como un eficiente modelo de gestión, en contraposición a la gestión pública del agua que predomina en el resto del estado. La falta de inversiones públicas en obras de captación y distribución, se utiliza como una de las razones por las que miles de personas invirtieron su dinero en la financiación de la perforación de galerías y pozos, y de los correspondientes canales de distribución.

Este régimen de propiedad del agua se considera actualmente un elemento clave que ha condicionado el desarrollo agrícola de las islas, principalmente en lo relativo a los cultivos de regadío. La posesión del agua ha sido sinónimo de riqueza y poder en el mundo rural canario. La búsqueda del agua subterránea fue iniciativa privada, apoyada por

campesinos y agricultores que la necesitaban para sus tierras. Pero también intervinieron otros agentes que no guardaban relación, en la mayoría de los casos, con los intereses agrarios, y decidieron invertir en el “negocio del agua”. Una comunidad de agua se creaba y era dividida en acciones o participaciones adquiridas principalmente por los agricultores para tener derecho a un determinado caudal para el riego de sus cultivos. El agua alumbrada se depositaba en los estanques y charcas, para luego ser transportada a través de una red de canales, también de iniciativa privada.

Si se encontraba agua, cada comunidad la repartía proporcionalmente a la cantidad invertida por cada persona, y estas decidían a qué la destinaban: uso propio, vender o arrendar temporalmente la gestión a un intermediario. El resultado es que ahora son realmente los intermediarios los que compran y venden el agua, y gestionan las acciones (de galerías y canales) de múltiples propietarios individuales o comunidades. El control de la gestión de todo el sistema puede estar en manos de un reducido grupo de personas, lo que se puede elogiar, como una clara mejora en la eficiencia, o combatir, por propiciar la consolidación de oligopolios. En cualquier caso, en un marco de escasa transparencia, es la confianza entre propietarios, intermediarios y compradores la base sobre las que se asienta actualmente la gestión del agua subterránea.

El agua llegaba al agricultor por la figura del “canalero”, que repartía periódicamente la cantidad que correspondía a los distintos propietarios o agricultores, el día y la hora convenida, fuera de día o de noche. Este sistema y el minifundio agrícola han traído aparejada una marcada atomización de estanques de riego, prácticamente uno por propiedad agrícola, de tal manera que hoy son un elemento más del paisaje rural.

El indudable peso del pasado ha generado la particular cultura canaria del agua, producto de la relación entre la naturaleza y el ingenio de los habitantes de cada isla. En las más húmedas islas occidentales (La Palma, El Hierro, La Gomera y Tenerife), se desarrollaron sistemas de captación de aguas manantes y superficiales, y la estrategia minera de las galerías. Gran Canaria, destaca por su variedad de arquitecturas hidráulicas (minas de agua, pozos, estanques, presas y canales). Y en las muy áridas islas orientales (Fuerteventura y Lanzarote), la captación de las aguas pluviales en aljibes y la perforación de pozos han sido las principales estrategias.

Pozos y galerías han sido las obras que cuentan con más tradición para extraer las aguas subterráneas canarias, aunque también existe todo tipo de híbridos entre ellos, como pozos con galerías en su interior, galerías con pozos en su frente, etc. Los pozos en Canarias son excavaciones verticales de 3 m de diámetro cuya profundidad es muy variable, en algunos superando los 500 m. Las galerías son excavaciones con una ligera pendiente ascendente para que la descarga del agua se lleve a cabo por gravedad. Miden 1,80 m de alto por 1,5 m de ancho, y su longitud puede

alcanzar hasta varios kilómetros. En todas las islas podemos encontrar ambos tipos de obras, aunque en Gran Canaria, con más de 2000 pozos censados, es el sistema dominante. En Tenerife, por el contrario dominan las galerías, con más de un millar que sobrepasan los 1600 m de perforación. Muchas de estas obras fueron excavadas a mano, con pico, pala y explosivos, y muchas vidas se perdieron en esta actividad.

Pero, curiosamente, a pesar del extenso desarrollo logrado por el éxito en los alumbramientos de aguas, apenas se disponía de información científica relativa a los acuíferos insulares, durante el periodo con mayor auge de esta actividad. A principios del siglo XX, cuando algunos nacientes comenzaron a mostrar los primeros síntomas de agotamiento, ciertos ilustrados y científicos empezaron a interesarse por los recursos hídricos. Así, por los años veinte, el geólogo Lucas Fernández Navarro ya incluía en su relación de problemas de Canarias, los relacionados con el agua; y Ramón De Ascanio y León, se interesó por las aguas subterráneas de Tenerife y Gran Canaria, subrayando su abundancia y animando a desarrollar proyectos para alumbrarlas. Con tanto pozo y tanta galería, a mediados del siglo XX los acuíferos comenzaron a mostrar evidencias indicativas de sobreexplotación. Las minas de agua excavadas desde antiguo en los cauces de los barrancos, fueron las primeras que se secaron. Luego en pozos y en galerías fue necesario seguir perforando para mantener los caudales. El problema del agua se iba agravando.

Por los años cincuenta Francisco Ortúño fue el primero en dar una estimación de lo que se denominó “lluvia horizontal” (hoy acertadamente reemplazada por “precipitación oculta”), un fenómeno que tiene gran importancia en las islas occidentales, donde la presencia del mar de nubes permite el establecimiento de una exuberante vegetación de monteverde. Las nieblas que forman el mar de nubes al chocar con las hojas de los árboles condensan cayendo en forma de pequeñas gotas de agua al suelo, donde además de sustentar a la vegetación, se infiltran pudiendo incorporarse a las aguas subterráneas.

Después, ya en los años sesenta, Federico Macau analizó los problemas inherentes a los recursos hídricos canarios y Enrique Fernández Caldas los de la calidad del agua de galerías. Telesforo Bravo, que dedicó su actividad investigadora principalmente al vulcanismo y al agua, atesoró un profundo conocimiento de la geología de las islas, asentado en parte en la valiosa información adquirida en sus investigaciones en las galerías. Bravo alcanzó un elevado prestigio en la caracterización de los acuíferos, principalmente en la isla de La Palma. Pero realmente hasta los años setenta el conocimiento hidrológico de Canarias estaba limitado a un reducido número de pequeñas investigaciones y a los estudios relacionados con las explotaciones de aguas subterráneas, que como pertenecían al ámbito privado, rara vez se hacían públicos.

El proyecto SPA-15 auspiciado por la UNESCO, dirigido por el ingeniero José Sáenz de Oiza y publicado en 1975 como *Estudio Científico de los Recursos de Agua en el Archipiélago Canario*, supuso un significativo impulso al conocimiento científico de la hidrología insular. En el SPA-15 se trató de recopilar toda la información disponible acerca de precipitación, infiltración y escorrentías, y su vinculación con los datos aportados por galerías y pozos, lo que permitió establecer el patrón de la circulación de las aguas subterráneas. A este periodo también corresponde el proyecto MAC-21, publicado en 1978, como *Proyecto de Planificación y Explotación de los Recursos de Agua de las Islas Canarias*. El MAC-21 complementó los datos del SPA-15, incluyendo una valoración de las demandas de agua, recabando información básica para la necesaria gestión de los limitados recursos hídricos de Canarias. Sin duda documentos de referencia para el diseño de políticas hidrológicas con vistas a racionalizar las producciones de agua y ponderar los criterios útiles para satisfacer adecuadamente las demandas.

Pero tal como se temía tanto en Gran Canaria como en Tenerife, y en menor medida en La Palma, el funcionamiento hidrológico de los acuíferos había sufrido una profunda alteración desde el comienzo de la explotación de los recursos subterráneos. Cada acuífero insular es comparable a un gran depósito de agua que tiene pequeñas entradas mediante la recarga natural, y descargas naturales bien al mar o a los nacientes. Al explotar los acuíferos se modifica el equilibrio anterior, aumentando las descargas del depósito, por lo que el nivel de reservas desciende. Los descensos progresivos de los niveles de reserva han obligado a reprofundizaciones sucesivas de pozos y galerías para llegar hasta el agua. Pero además, simultáneamente se ha detectado pérdida de calidad en las aguas subterráneas. Esta degradación parece relacionarse con el acceso a aguas antiguas más mineralizadas y con CO₂ disuelto, a la intrusión de agua de mar o a la contaminación por aguas de riego con altos niveles de nitratos y residuos de plaguicidas.

La calidad del agua subterránea es evaluada dependiendo del uso al que se vaya a destinar. Las normas más estrictas son para las destinadas a bebida, que se extiende también a la mayor parte del agua de uso doméstico, de acuerdo con las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y las Directivas emanadas de la Unión Europea. En general las aguas subterráneas de baja conductividad eléctrica (aguas dulces) son potables sin más restricciones y están exentas de gérmenes patógenos, aunque en ocasiones su dureza o exceso de sodio pueden ser inconvenientes. El exceso de flúor en algunas aguas requiere tratamientos costosos, por lo que evitar determinados niveles del acuífero, puede aminorar el problema.

Sin embargo, la calidad del agua para uso agrícola viene definida por su salinidad y por la capacidad de modificar la drenabilidad del suelo.

También depende de la planta cultivada y de cómo se realiza el riego. Una elevada salinidad del agua deja, tras su evapoconcentración, un agua edáfica aun más salina que dificulta su toma por las raíces. Un notable exceso de sodio sobre los otros cationes dispersa los aglomerados del suelo, y hace que el exceso de agua de riego drene mal hacia abajo y el suelo se encharque. Aunque la mayor parte de las aguas subterráneas de poca y media profundidad son dulces, se pueden alumbrar aguas salobres principalmente cerca de la costa.

Las aguas subterráneas son esenciales para el abastecimiento, pero ante esta situación, la planificación hidrológica está apostando actualmente porque la procedencia de los recursos hídricos sea diversa, fomentando otras fuentes como la desalación de agua de mar y la reutilización de las aguas depuradas.

Por otra parte, las características climáticas de Canarias con lluvias generalmente escasas, aunque con un importante grado de variación entre las diferentes islas, así como por sus características geomorfológicas explican la escasez de aguas superficiales, y la dificultad para aprovechar la escorrentía superficial. En todas las islas se reconocen varias cuencas hidrográficas que funcionan como vías de drenaje prioritarias, por donde se evacua con dirección a la costa el agua de escorrentía procedente de la lluvia de las partes altas de las islas. Estas aguas superficiales han atraído el mayor porcentaje de inversiones públicas, aunque la escorrentía superficial proporciona unos caudales muy inferiores a los captados por explotaciones subterráneas. Islas prácticamente sin barrancos, como El Hierro, podemos asumirlas como permeables y en ellas domina la infiltración; mientras al contrario, la abundancia de barrancos, como en La Gomera, es indicativa zonas impermeables, y con elevada escorrentía.

Hay cierta tradición en la utilización de las aguas de escorrentía. Los denominados “tomaderos”, un obstáculo en el barranco para desviar el agua que discurre por él, hacia un depósito, son típicos de las islas. Los aljibes, depósitos utilizados para recoger y almacenar el agua de la lluvia son otra de las formas de aprovechamiento de las aguas superficiales. Los tejados de gran pronunciación tenían la función de recoger el agua de la lluvia para conducirla hacia un aljibe situado habitualmente bajo los patios de las viviendas.

La construcción de embalses destinados a almacenar el agua superficial es relativamente reciente. Su eficacia es bastante relativa dada la irregularidad de las aguas superficiales, la ausencia de grandes vasos de captación, la permeabilidad del sustrato y la calidad de las aguas embalsadas, con frecuencia con gran cantidad de tierra y sedimentos arrastrados por los barrancos. Los embalses consisten en un dique de cierre o presa construido en el lugar más favorable de un barranco para conseguir una capacidad de embalse adecuada. Son especialmente numerosos en La

Gomera y Gran Canaria y deben de estar diseñados para no verse desbordados cuando los barrancos corren con fuerza. Sin embargo, en Tenerife forman parte de alguno de los fracasos más sonados de los esfuerzos de la política hidráulica en la isla.

Como alternativa a los embalses tradicionales, en las últimas décadas del pasado siglo, comenzaron a construirse balsas, diseñadas para la regulación de los recursos hídricos especialmente para riego agrícola, almacenando aguas superficiales captadas por barrancos o bien aguas excedentes de las galerías. Más recientemente también para aguas procedentes de plantas desaladoras o de plantas depuradoras para su reutilización. Son especialmente importantes en Tenerife como reguladoras de los excedentes invernales de las explotaciones agrarias que recibían aguas procedentes de galerías. Las balsas consisten en grandes depósitos hacia los que se conduce el agua y que están construidos en depresiones naturales del terreno que se conforman artificialmente, suavizando los taludes e impermeabilizando para evitar las filtraciones.

El que las sedientas islas orientales hubieran apostado por la desalación del agua de mar ha supuesto con el paso de los años un cambio significativo en la gestión de los recursos hídricos a nivel de todo el archipiélago. En 1964 se puso en funcionamiento la planta desaladora de Arrecife en Lanzarote, a la que siguieron en años sucesivos nuevas plantas en Gran Canaria y Fuerteventura, y en menor medida en la provincia occidental. En la actualidad hay más de 300 plantas desaladoras de diferentes dimensiones en funcionamiento, y en algunas islas, como Lanzarote y Fuerteventura, cubren el 100% del abastecimiento. La evolución tecnológica en el proceso de desalación, hasta la presente ósmosis inversa, ha permitido mejorar la eficiencia y los costes de producción, de manera que en la actualidad se estima que el agua desalada es aproximadamente solo tres veces más costosa que el agua natural.

Aunque la implantación de las desaladoras ha supuesto una solución al problema del abastecimiento de agua a la población, al sector agrícola y ha permitido en gran medida el presente desarrollo turístico, estos sistemas de producción industrial de agua tienen un coste energético bastante considerable, aunque inferior al de hace 30 años debido a los avances técnicos, pero con una evidente dependencia del precio de los combustibles. Pero además hay un coste ambiental muy importante que es necesario tomar en consideración como es el generado por los vertidos de salmueras en la costa. Para los próximos años, la reducción de los químicos empleados en el proceso, la sustitución de energías fósiles por energías renovables, la distribución del agua desde la costa al interior, la mejora de la eficiencia energética y la solución sostenible al problema de las salmueras, son los retos a los que Canarias se enfrenta en este ámbito.

Mientras, resolver el saneamiento y la depuración de las aguas residuales está entre los problemas más apremiantes a los que se deben enfrentar las islas en estos momentos. El aumento de la preocupación social respecto a los vertidos al mar, y la presión de la Comisión Europea por el incumplimiento de las directivas en esta materia, obligarán a los gestores canarios a alcanzar soluciones a corto plazo. Se sabe que la mayor parte de la contaminación litoral se debe a las aguas residuales urbanas. La proliferación de núcleos urbanos cerca de la costa es responsable de la regresión o degradación de los ecosistemas marinos costeros debido al aumento de la concentración de nutrientes y de materia orgánica. Consecuentemente, reducir las entradas de nutrientes al ecosistema constituye la principal medida de restauración, y obliga a la vigilancia y control de los vertidos de los emisarios submarinos, evaluando sus efectos sobre las comunidades marinas. La Directiva Marco Europea del Agua del año 2000, cuyo objetivo es la lucha contra la contaminación, obliga a los estados a mejorar la calidad de sus aguas costeras. Por eso, la puesta en marcha de nuevas plantas depuradoras dotadas de modernas infraestructuras permitirá llevar a cabo todos los tratamientos que exige la Unión Europea y de este modo regenerar para riego la mayor parte de las aguas residuales recogidas por la red de saneamiento, que ahora en gran medida son vertidas al mar.

Pero a principios de este siglo la situación era bastante penosa. La mayor parte de las aguas residuales urbanas iban directamente al mar sin tratamiento, incumpliendo los requisitos legales, y un alto porcentaje de viviendas no estaban conectadas a la red de saneamiento vertiendo las aguas residuales al subsuelo mediante pozos negros, problema aún por solucionar en muchas comarcas. De manera, que ampliar y mejorar la red de saneamiento y eliminar los pozos negros sigue siendo un reto primordial, una vez puestas en marcha la red de plantas depuradoras.

Por último, no hay que olvidar que un eficiente ciclo integral del agua conlleva un coste energético que debe ser convenientemente valorado. Los recursos energéticos son necesarios para el proceso de captación de aguas del acuífero o para la desalación de aguas de mar o salobres, también para la distribución hasta los lugares de consumo, la posterior recogida de las aguas utilizadas mediante la red de saneamiento, su tratamiento en las plantas de depuración y regeneración y su devolución al sistema. Que estos recursos procedan de energías limpias renovables debe ser también un reto.

“El agua en Canarias es un recurso natural escaso y valioso, indispensable para la vida y para la mayoría de las actividades económicas”, es el primer párrafo de la ley de Aguas de Canarias de 1990. Una ley que establece como unidades territoriales de gestión integral de las aguas a las denominadas demarcaciones hidrográficas, es decir, cada una de las siete islas. Cada una de ellas cuenta con su correspondiente Consejo

Insular de Aguas al que le corresponde asumir de manera descentralizada la dirección, ordenación, planificación y gestión de las aguas. La ley también mantiene la pervivencia de la propiedad privada sobre la mayor parte de las aguas subterráneas.

Consecuentemente la gestión del agua en Canarias es un vasto territorio que abarca multitud de parcelas de elevado interés, tanto a nivel científico como social. Sin duda una materia merecedora de ser tratada desde un punto de vista divulgativo, y por eso fue seleccionada como temática para el ciclo de conferencias anualmente dedicado a Telesforo Bravo, que organizan conjuntamente el INSTITUTO DE ESTUDIOS HISPÁNICOS DE CANARIAS y la FUNDACIÓN TELESFORO BRAVO – JUAN COELLO.

Con **Agua: reflexiones para una gestión eficaz**, hemos pretendido abordar una parte de la problemática del agua en Canarias, mediante las aportaciones científicas de cinco expertos en relación a diferentes cuestiones implicadas en el ciclo integral del agua. Como es tradicional, la Semana Científica desarrolló su programa en el salón de actos de la sede del IEHC, entre el lunes 19 y el viernes 23 de noviembre, con sesiones diarias de 19:30 a 21:00 horas. La programación se abrió con la presentación del ciclo realizada por Jaime Coello Bravo y Julio Afonso Carrillo, que respectivamente, pormenorizaron las características de la programación científica y presentaron el libro de actas con las conferencias del ciclo del año precedente, titulado *“La Palma: agua, tierra, fuego y cielo”*.

Las conferencias del programa de la XIV Semana Científica Telesforo Bravo fueron las siguientes:

Lunes, 19 noviembre 2018.

María Victoria Marzol Jaén: “Métodos alternativos de obtención de aguas”.

Martes, 20 noviembre 2018.

Pilar García Alonso: “Estado actual del aprovechamiento del agua subterránea en Canarias”.

Miércoles, 21 noviembre 2018.

Jaime J. González González: “Construcción de grandes presas en Canarias y la singularidad de Gran Canaria”.

Jueves, 22 noviembre 2018.

Óscar Monterroso Hoyos: “Estudios ambientales en relación con los vertidos de tierra al mar en Canarias”.

Viernes, 23 noviembre 2018.

Luisa Vera Peña: “Aguas residuales y oportunidades asociadas a su depuración y regeneración”.

La presente publicación compila los contenidos que fueron presentados en cada una de estas conferencias.

En la primera sesión, María Victoria Marzol Jaén, climatóloga y Catedrática de Geografía Física de la Universidad de La Laguna, nos ilustró acerca del agua de condensación de niebla como un método alternativo para la obtención de agua. Marzol nos explicó los condicionantes geográficos que permiten que en las islas Canarias la formación del mar de nubes, y que en algunos países del mundo se están desarrollando con éxito proyectos de aprovechamiento de agua procedente de la niebla, tratando de imitar a las hojas de los árboles, pero utilizando para ello mallas sintéticas. Nos describió sus estudios sobre este proceso empleando diferentes tipos de malla en el Parque Rural de Teno, para finalizar comentando sus proyectos en otras regiones del mundo, como el llevado a cabo en Marruecos para analizar el potencial de recolección de agua de niebla. En el artículo aquí publicado se ha desarrollado solo una parte de la conferencia, la relativa al comportamiento del mar de nubes durante el verano en la isla de Tenerife a partir de las observaciones realizadas desde las torres de vigilancia, y ha contado con la colaboración de Jonás Trujillo García.

En la segunda sesión, María Pilar García Alonso, Ingeniera de Minas de MPGA Ingeniería, desarrolló la situación actual del aprovechamiento de las aguas subterráneas de Canarias. García nos explicó que gracias a la iniciativa de muchos canarios fue posible el alumbramiento de aguas subterráneas que permitieron el riego de cultivos y el progreso, pormenorizando posteriormente los diferentes tipos de galerías y de pozos empleados para este fin. Realizó un recorrido por las diferentes islas destacando que son las de mayor superficie las que presentan un mayor número de instalaciones hidráulicas, y examinó los principales aspectos que caracterizan a pozos y galerías. La situación en la actualidad de las instalaciones subterráneas fue motivo de un detallado análisis en el que García abordó entre otros aspectos la sobreexplotación, los planes hidrológicos, el mantenimiento, la seguridad o el envejecimiento de las comunidades de aguas, para seguidamente reflexionar sobre su futuro.

En la tercera sesión, el geógrafo Jaime J. González Gonzálvez dedicó su intervención a presentarnos las grandes presas realizadas en Canarias con particular atención a las de la isla de Gran Canaria. La necesidad de asegurar el riego de sus terrenos hizo que los agricultores encargarán a los ingenieros redactar proyectos de grandes presas, a pesar de las dificultades técnicas que conlleva cerrar un barranco. González nos reveló que en Canarias se construyeron más de 100 grandes presas entre 1900 y 1990, lo que representa un enorme patrimonio hidráulico con notorios valores históricos y etnográficos. Realizó un detallado recorrido por las características técnicas de estas singulares construcciones, señalando que en la década de 1960 tuvo lugar la transición en lo relativo a materiales y

tipologías, pasando de presas de mampostería con mortero de cal o mixto a presas de hormigón, para concluir que en la diversidad del paisaje canario las grandes presas de mampostería ciclópea no solo son las grandes obras hidráulicas de Canarias, sino que también son los grandes elementos patrimoniales históricos y culturales de la antigua forma de hacer agricultura.

Óscar Monterroso Hoyos, biólogo marino, intervino en la cuarta jornada y nos documentó sobre los estudios ambientales que realizan en el Centro de Investigaciones Medioambientales del Atlántico S.L. (CIMA) sobre los vertidos de tierra al mar en Canarias. Nos mostró que uno de los problemas ambientales más importantes que tenemos en nuestro entorno inmediato es la degradación ambiental acumulativa que se produce en nuestros mares debido a los vertidos desde tierra y que afectan a nuestro litoral y a los ecosistemas marinos costeros. La legislación vigente, emanada de las directrices de la Unión Europea, obliga a la realización de estudios ambientales tanto durante el planeamiento de un vertido autorizado, como después de puesto en funcionamiento, para valorar su correcta gestión. Monterroso explicó que estos estudios ambientales los llevan a cabo biólogos marinos especializados en gestión ambiental y consisten en minuciosos protocolos que fue detallando sucesivamente desde una etapa inicial de recopilación de toda la información disponible sobre la zona de posible afección por el vertido, al estudio hidrodinámico de la zona, la cartografía de las comunidades y de los hábitats del litoral, hasta el estudio de las calidades del agua y del sedimento en los fondos no rocosos. Disponiendo de toda esta información, los potenciales impactos en el medioambiente de un vertido de tierra al mar pueden ser analizados y valorados adecuadamente, con el propósito de que puedan sustentar las decisiones oportunas. En la preparación del artículo también participaron el resto de investigadores de CIMA (Myriam Rodríguez, Eva Ramos, Óscar Pérez, Omar Álvarez, Lorenzo Cruces y Amaya Miguel), que de este modo también se suman a este libro homenaje a Telesforo Bravo.

En la quinta sesión, Luisa Vera, Profesora Titular de Ingeniería Química del departamento de Ingeniería Química y Tecnología Farmacéutica de la Universidad de La Laguna nos presentó una detallada visión actual de las aguas residuales y su gestión, así como de las oportunidades que pueden generar los nuevos modelos de tratamiento. La profesora Vera nos explicó que el estado español había realizado un gran esfuerzo transformando la gestión de las aguas residuales durante las últimas décadas del siglo XX, pero que en la segunda década del presente siglo se produjo un colapso generalizado en dicho avance con la llegada de la crisis económica, la disminución de fondos comunitarios y una falta generalizada de previsión política en los diversos niveles de competencias de la administración. En Canarias se han realizado notables inversiones en

las últimas décadas para dotar a las islas de infraestructuras para la recogida y tratamiento de aguas residuales, pero en la actualidad estas resultan todavía manifiestamente insuficientes. Vera analizó las cifras relativas a las aguas residuales en Canarias, antes de presentar una detenida descripción de las diferentes fases que abarcan los tratamientos de depuración para posteriormente adentrarnos en la prometedora temática de la regeneración de las aguas residuales.

De manera que la preparación del presente libro ha sido posible gracias a la inestimable colaboración de los conferenciantes, que aceptaron la invitación para participar en la semana científica, y han redactado desinteresadamente los artículos que aparecen publicados en estas páginas. Como en las publicaciones anteriores contamos la valiosa colaboración de :REC RETOQUE ESTUDIO CREATIVO, que diseñó la cubierta y el documento final para imprenta. En el proceso de organización del ciclo de conferencias Jaime Coello Bravo y el autor de estas líneas han contado con la inestimable colaboración de Nicolás Rodríguez, Jerónimo de Francisco Navarro e Iris Barbuzano Delgado.

Como en ciclos anteriores, una masiva asistencia de público en cada una de las jornadas dejó patente el cariño con que cada año es acogido este ciclo. El agradecimiento del IEHC a todos los asistentes.

Finalmente, la presente publicación mantiene el compromiso original de esta colección de actas que persigue mantener vivo el recuerdo y ser homenaje de reconocimiento del IEHC hacia Telesforo Bravo.

*Julio Afonso Carrillo
Vicepresidente de Asuntos Científicos del IEHC*

ÍNDICE

Págs.

- 1. El comportamiento del mar de nubes durante el verano en la isla de Tenerife a partir de su observación desde las torres de vigilancia,**
por M^a VICTORIA MARZOL JAÉN Y JONÁS TRUJILLO GARCÍA 21 – 44
- 2. Estado actual del aprovechamiento del agua subterránea en Canarias,**
por MARÍA PILAR GARCÍA ALONSO 45 – 71
- 3. Construcción de grandes presas en Canarias: la singularidad de Gran Canaria,**
por JAIME J. GONZÁLEZ GONZÁLVEZ 73 – 107
- 4. Estudios ambientales en relación con los vertidos de tierra al mar en Canarias,**
por ÓSCAR MONTERROSO-HOYOS, MYRIAM RODRÍGUEZ, EVA RAMOS, ÓSCAR PÉREZ, OMAR ÁLVAREZ, LORENZO CRUCES Y AMAYA MIGUEL 109 – 135
- 5. Aguas residuales y oportunidades asociadas a su depuración y regeneración,**
por LUISA VERA 137 – 163

1. El comportamiento del mar de nubes durante el verano en la isla de Tenerife a partir de su observación desde las torres de vigilancia

M^a Victoria Marzol Jaén y Jonás Trujillo García

Departamento de Geografía e Historia. Universidad de La Laguna
mmarzol@ull.edu.es – jtrujillo@hotmail.com

In Memoriam de Victor Hernández
 Abril 1967 – Febrero 2019

La aproximación al conocimiento de la capa nubosa de estratocúmulos en Canarias, conocida por nosotros como “mar de nubes”, se ha realizado desde diferentes campos de la ciencia – por muy dispares motivos y metodologías–, por investigadores, curiosos, viajeros, conocedores del tema, etc. En este artículo queremos acercarnos a este rasgo tan distintivo de nuestro clima, el mar de nubes, desde el aire porque los datos que aquí presentamos son fruto de la colaboración de muchas personas que desde las torres contra incendios, a 15 metros de altura, vigilan nuestro territorio para avisar de los conatos de incendio que se producen en los meses de verano, momento en el que nuestros bosques están más secos y constituyen un gran peligro. Los vigilantes de dos torres en Tenerife, las del El Gaitero –situada 1.710 m de altitud en la dorsal central de la isla– y la de Bolico –localizada a 1.340 m, en el Noroeste de la isla–, además de su trabajo “oficial” se convirtieron en oteadores y observadores del

mar de nubes. Esa valiosa colaboración comenzó en el año 1998 y se ha mantenido durante casi veinte años, hasta 2018. Su observación ha sido fundamental para saber cómo se comporta el mar de nubes durante los meses de junio a octubre. Por ello, este trabajo está dedicado a todas esas personas y en especial a Victor Hernández Beltrán que nos dejó inesperadamente el 16 de febrero de 2019.

Este trabajo constituye una parte de la conferencia impartida por la autora en la XIV Semana científica Telesforo Bravo, cuyo título era “Métodos alternativos de obtención de agua”.

Introducción

La localización geográfica del archipiélago canario, en torno a los 28° N de latitud, le infiere unos rasgos atmosféricos y climáticos característicos –que también se encuentran en otros lugares del planeta como las costas de California, Chile, Marruecos, Namibia y SW de Australia–, como son la cercanía de un anticiclón oceánico (el nuestro llamado anticiclón de Azores), los vientos alisios oceánicos y una corriente oceánica fría (la nuestra es la corriente fría de Canarias). La combinación de estos factores, unido a otros dos factores de carácter geográfico, la insularidad y la altitud y orientación del relieve, definen el clima de las islas (Marzol, 1993; Marzol & Suárez, 2012). A riesgo de cometer una exageración, afirmaría que el mar de nubes es el rasgo más singular y destacable del clima de las islas Canarias y, también, el más benefactor porque gracias a él se depositan importantes cantidades de agua en los bosques de las medianías de las islas más elevadas, suaviza las temperaturas de tal forma que ni el verano ni el invierno de las tierras situadas por debajo de este manto nuboso conocen días calurosos y fríos en extremo siempre que esté echado el mar de nubes sobre ellos. Tampoco hay que olvidar cómo todos los isleños deseamos su presencia cuando vemos nuestros montes arder bajo las llamas, coincidiendo con la llegada de un viento seco y cálido procedente del Sáhara y la desaparición del húmedo y refrescante mar de nubes. Está en nuestra memoria el pavoroso incendio que ha arrasado las cumbres de Gran Canaria en el verano de 2019.

El mar de nubes es una capa nubosa formada por un tipo de nubes que se llaman estratocúmulos, con origen en el anticiclón de las Azores, que avanzan por el Atlántico oriental al ritmo de los vientos alisios hasta que se encuentran con los archipiélagos de la Macaronesia de Madeira, Canarias y Cabo Verde. Su rasgo más destacado es que están compuestos por minúsculas gotitas que no pueden caer en forma de lluvia y quedan a merced del viento hasta que chocan con algún obstáculo dando lugar a la

conocida “precipitación oculta” puesto que no se mide con los pluviómetros oficiales y, además, que son nubes bajas, más o menos compactas, que se extienden en la horizontal como si de un manto o capa se tratara.

La mayor cantidad de descripciones y alusiones a su espectacularidad la encontramos desde la segunda mitad del siglo XVIII hasta los años 30 del siglo XX (García Pérez, 1988; González Lemus, 1995; Pico & Corbella, 2000). Muchas de ellas son fruto de la visita y estancia en las islas de viajeros y científicos que siempre les llamó la atención este fenómeno meteorológico. Verneau, Humboldt, Glas, Berthelot, Coquet, Edwardes, Osuna y Saviñón, Arribas y Sánchez, Bory de Saint Vicent, Viera y Clavijo, Unamuno, etc. son algunos de los exponentes en cuyas obras encontramos descripciones del mar de nubes. Tan sólo incluimos un párrafo de Charles Edwardes que, en 1888, se hace eco de la frecuencia de esta nubosidad:

“El mismo Pico es invisible; el banco de nubes sobre el valle no se había elevado durante casi una quincena. Únicamente la cima podía ser vista en el mar, a cincuenta millas de distancia...” (EDWARDES, 1888. Rides and studies in the Canary Islands. London, p. 40. Extraído de Valladares, 1995).



Fig. 1. La densa capa del mar de nubes que cubría la vertiente Norte de Tenerife el 10 de junio de 2006, y que impedía la llegada del sol hasta el litoral, es una estampa habitual durante el verano de la que se hace eco Edwardes en 1888. © M^a Victoria Marzol.

La existencia de esa nubosidad está ligada a la potencia y altura de la inversión térmica de subsidencia –otro de los rasgos de nuestro clima–, de tal forma que el mar de nubes es más frecuente y se encuentra a menor altura en verano, mientras que en invierno alterna su presencia con situaciones de inestabilidad y su mayor altitud permite que desborde las cimas de las cumbres de algunas islas. Hay un tercer rasgo que lo caracteriza, es su mayor frecuencia entre las ocho de la noche y las ocho de la mañana que en las horas del mediodía, el 80% frente al 20% respectivamente (Marzol, 2003, 2008).

La inversión térmica se alía con el mar de nubes para hacer más singular el clima de las islas Canarias. En una atmósfera normal, conforme ascendemos en altitud la temperatura va disminuyendo lentamente porque el aire tiene menos capacidad de retener el calor. Ese descenso está estipulado en un gradiente medio de 0,56 °C a 0,65 °C cada 100 metros de ascenso. De ocurrir eso en Tenerife, por ejemplo, de los 19 °C de temperatura media que hay en el Puerto de la Cruz llegaríamos a Las Cañadas del Teide con 6,4 °C o 4,4 °C –dependiendo del gradiente utilizado– cuando en realidad la temperatura es de 9,6 °C.

La inversión térmica está presente en nuestra atmósfera por encima del 95% de los días del año (Dorta, 1995). Es más frecuente y potente en verano que invierno, y como consecuencia de ella se detiene el crecimiento de las nubes, dando como resultado el manto nuboso del mar de nubes por debajo de esa inversión. En la figura 2 se muestra la frecuencia mensual de la inversión en la vertiente Norte de Tenerife, porque hacía más calor en Aguamansa, situada a 1.080 metros de altitud, que en La Guancha, a tan solo 572 metros. Esta circunstancia asegura la presencia del mar de nubes por debajo de esa altitud.

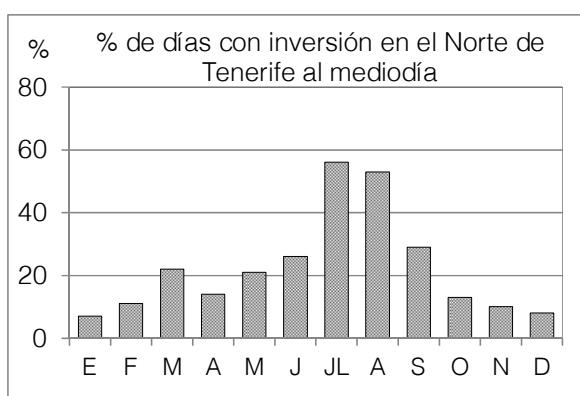


Fig. 2. Porcentajes medios mensuales de días en los que la temperatura es superior en La Guancha (a 572 m) que en Aguamansa (a 1.080 metros de altitud) como consecuencia de la inversión térmica de subsidencia.



Fig. 3. El aspecto perlado y grisáceo de la base del mar de nubes hizo que Pérez Galdós se refiriera a él como *panza de burro* y así la conocen en la isla de Gran Canaria. © M^a Victoria Marzol.

El mar de nubes “organizador de la insolación”

En trípticos informativos de las agencias de viaje e, incluso, en el boca a boca se dice que en Canarias *hay seguro de sol*; es más, hace años fue uno de los reclamos más utilizado para la atracción de turistas a nuestras islas. Es cierto que por estar más cerca del trópico de Cáncer la radiación solar es superior que en el resto de Europa; sin embargo, la frecuencia del mar de nubes en algunos sectores de las islas es tal que trastoca esa realidad y como consecuencia de ello se registran menos horas de sol de las que les corresponde. De la figura 4 se pueden extraer varias conclusiones muy rotundas relacionadas con el papel del mar de nubes como organizador de la insolación en las islas. Primero, que durante todo el año en las vertientes meridionales hace siempre más sol que en las septentrionales (p.e. si comparamos lo que ocurre en el Puertito de Güímar frente al Puerto de la Cruz, en San Andrés frente a Taganana). Segundo, que las cumbres de las islas, salvo La Gomera, El Hierro, Lanzarote y Fuerteventura, poseen más horas de sol porque suelen estar por encima de las nubes y no hay

obstáculos que detengan a los rayos solares (p.e. Izaña en Tenerife y San Mateo en Gran Canaria). En tercer lugar, que los meses de junio y julio son menos soleados en las vertientes del Norte que en las del Sur fruto del estancamiento nuboso sobre esa vertiente; es más, en julio hay menos horas de sol que en mayo o septiembre (p.e. en el Puerto de la Cruz, Taganana o la ciudad de Las Palmas). Eso es una anomalía causada porque el estancamiento del mar de nubes, entre los 700 y 900 metros de altitud de esas vertientes, dificulta la llegada de los rayos solares hasta la costa.

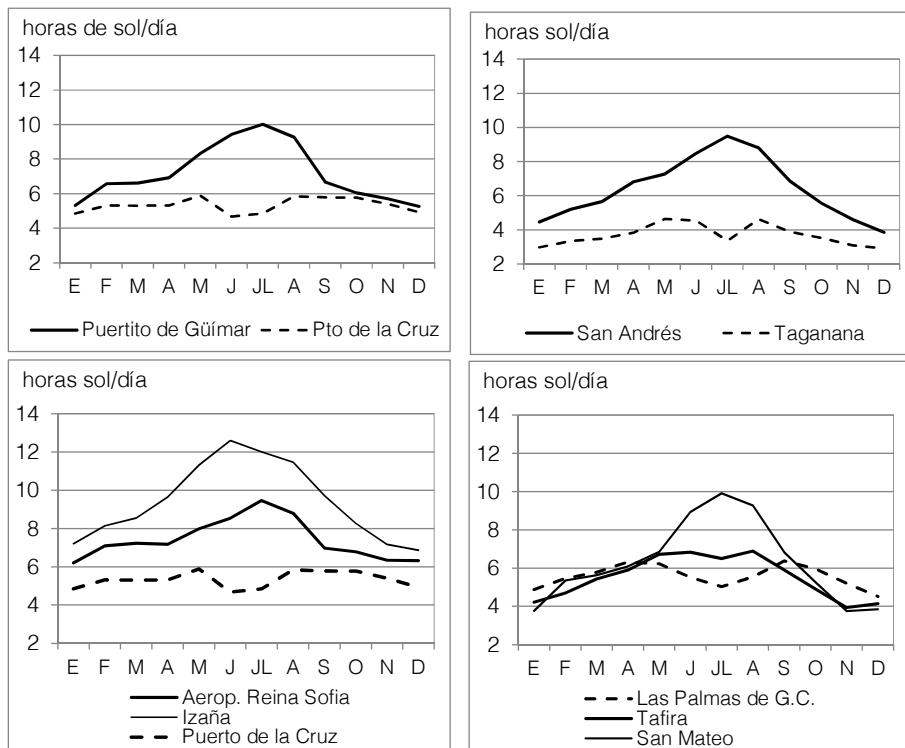


Fig. 4. Evolución mensual de las horas de sol al día en diferentes lugares de las islas dependiendo de la altitud y vertiente en que se encuentren. Fuente de los datos: AEMET. Elaboración propia.

El mar de nubes “regulador” térmico

Uno de los efectos más relevantes del mar de nubes es el de regulador térmico, conocido como efecto invernadero natural. El efecto invernadero, en estos momentos “la bestia negra” del planeta por su aumento imparable, tiene el destacable papel de mantener una temperatura en el planeta que lo

hace habitable, de no ser por él en la Tierra no habría vida. De todos los gases que forman el efecto invernadero, el vapor de agua es el que contribuye con más grados a dicho efecto. Por eso, la capa nubosa del mar de nubes tiene la misión de reducir la radiación directa que llega hasta la superficie durante las horas diurnas pero también la de impedir que se pierda parte del calor nocturno. Así, la figura 5 nos muestra cómo a pesar de que la temperatura media de Arrecife de Lanzarote y de Mazo, en la vertiente oriental de La Palma, es muy similar (21,2 y 20,4 °C respectivamente) existen notables diferencias entre el mediodía –más caluroso en Arrecife que en Mazo– y la noche que, al contrario, es más templada en Mazo que en Arrecife. La explicación no es otra que el que las nubes estancadas sobre Mazo impiden que el calor recogido durante el día por la Tierra se pierda a la atmósfera.

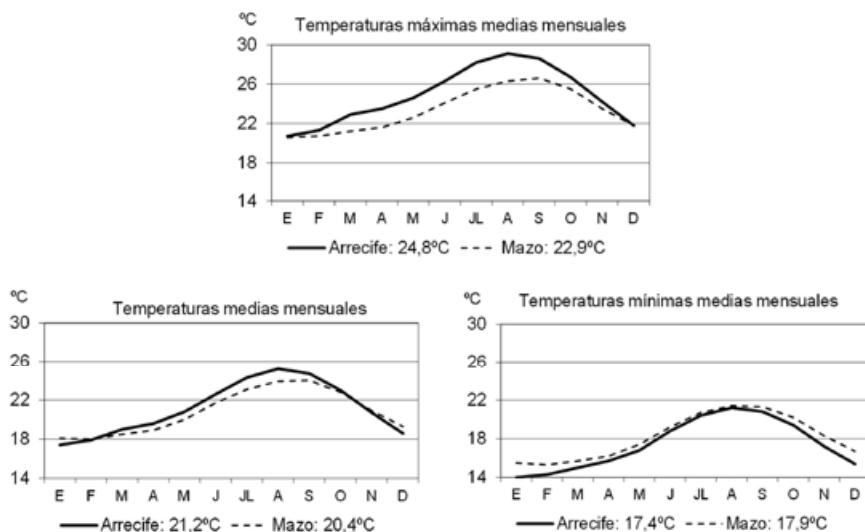


Fig. 5. El papel del mar de nubes como efecto invernadero es tan importante que mitiga el calor durante el mediodía en Mazo –casi siempre nublado– y hace que las noches sean más cálidas en Mazo que en Arrecife. Las temperaturas máximas nos indican lo que ocurre al mediodía mientras que las mínimas representan las de primeras horas del amanecer. Fuente de los datos: AEMET. Elaboración propia.

Las torres de vigilancia

En la isla de Tenerife la primera torre de vigilancia que se construye es la de El Gaitero, a comienzos de los años 70. Se sabe que era de madera. Diez años más tarde se levantan las de Los Topos, San Juan, Arguazo y

Picacho; en 1985 la de Chavao, situada en Guía de Isora, y la última, en el año 1992, es la de Bolico. Todas ellas tienen entre 12 y 14 metros de altura y se localizan en lugares con buena visibilidad con el fin de cubrir todo el territorio insular y así poder vigilar nuestros montes (Fig. 6).

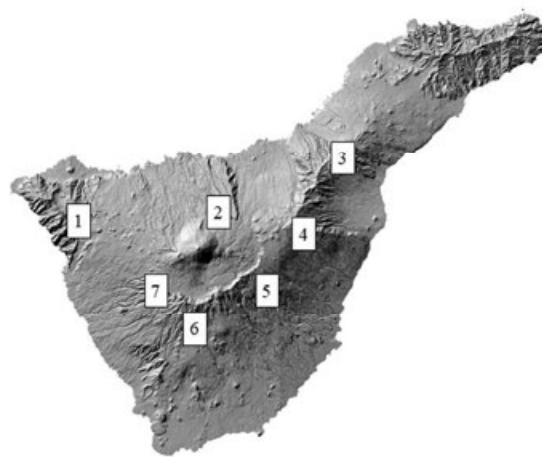


Fig. 6. Mapa con la localización de las siete torres contraincendios. El nombre de cada una de ellas corresponde a los números indicados en la tabla 1.

Tabla 1. Características geográficas de las siete torres contraincendios de la isla de Tenerife. Su localización se indica en el mapa de la figura 6.

TORRE DE VIGILANCIA	MUNICIPIO	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD (m)
1 Bolico	Buenavista del Norte	28°18'39" N	16°49'25" W	1.340
2 San Juan	San Juan de La Rambla	28°19'42" N	16°36'40" W	1.707
3 El Gaitero	La Victoria de Acentejo	28°23'41" N	16°26'00" W	1.743
4 Arguazo	Güímar	28°17'59" N	16°28'20" W	1.903
5 El Picacho	Arico	28°13'27" N	16°31'16" W	1.655
6 Los Topos	Vilaflor	28°10'18" N	16°39'05" W	1.833
7 Chavao	Guía de Isora	28°13'11" N	16°42'20" W	2.075

El estudio de la nubosidad plantea importantes retos porque no existe un instrumento específico que registre esa variable meteorológica; tan solo en las estaciones de AEMET de primer orden se dispone de su medición visual (Marzol *et al.*, 1996, 2001). Así, la localización privilegiada de las torres contraincendios ha sido fundamental para solicitar la colaboración de los vigilantes en la observación del mar de nubes de los valles de La

Orotava y de Güímar en el caso de la torre de El Gaitero y del valle de Santiago del Teide, Teno Alto y Noroeste de la isla por parte de la torre de Bolico. Desafortunadamente, por una drástica reducción de presupuesto y la necesidad de construir un radar meteorológico en el lugar que se hallaba esta última, se ha ido reduciendo el número de torres hasta quedar operativas tan sólo dos en el año 2018, las de El Gaitero y El Picacho.



Fig. 7. Evolución de la torre de vigilancia de El Gaitero. La primera imagen data de los años 80 y tenía una base triangular (imagen extraída de la fototeca forestal del INIA), la segunda, con base cuadrangular es de 1998 cuando se comienza la colaboración (imagen de M^a V. Marzol) y la tercera es de 2012, mucho más robusta y algo más alta, muestra la sustitución que el Cabildo Insular realizó a raíz de la tormenta Delta (imagen de M^a V. Marzol).



Fig. 8. Imágenes que recorren los últimos años de la torre de vigilancia de Bolico. La primera es del año 2002, su sustitución por el nuevo modelo se realiza en el año 2006 y permanece así hasta 2019 que se derriba para instalar un radar meteorológico. © M^a V. Marzol.

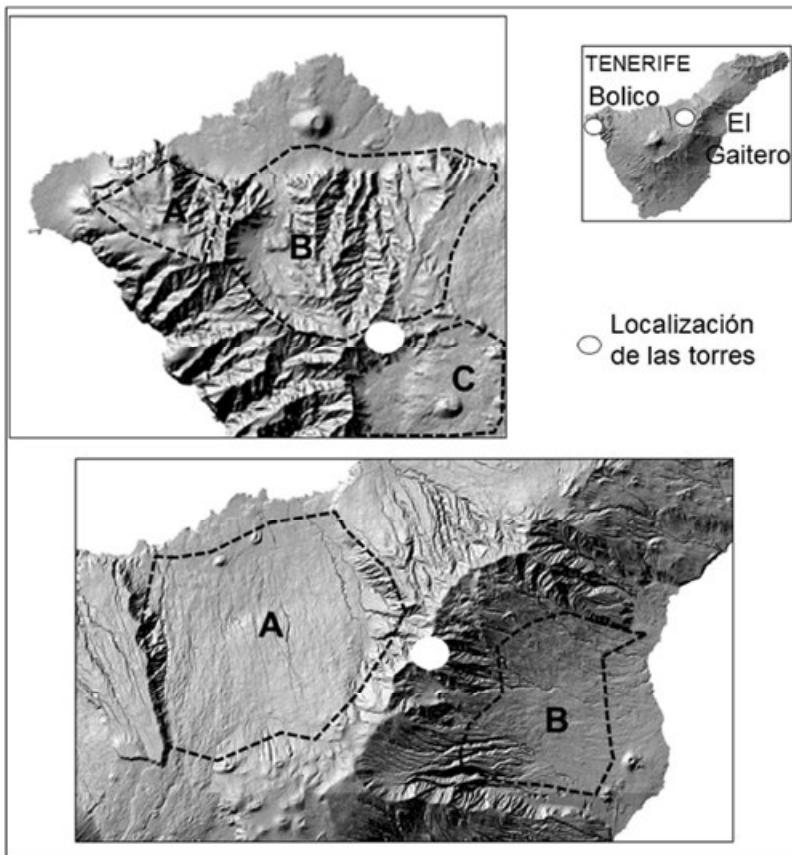


Fig. 9. La magnífica localización de ambas torres permite la correcta visualización de amplios sectores que habitualmente están cubiertos por el mar de nubes. En Bolico se distinguieron 3 sectores que aparecen referenciados en la figura 10, mientras que desde la torre del Gaitero se anotaba los datos referidos a los valles de Güímar y de La Orotava.

La información utilizada

El trabajo realizado por los vigilantes de las dos torres ha consistido en anotar las horas en las que estaba presente el mar de nubes en el valle de La Orotava y el valle de Güímar –en el caso de la torre de El Gaitero– y en los valles de Santiago, El Palmar y Teno Alto en la de Bolico. Además, en ambos casos se marcaban las horas en las que la niebla cubría las torres, distinguiendo si era niebla seca –porque no depositaba agua– o niebla mojadora porque se recogía agua. Esta información se recogía en tablas sencillas como las que muestran las figuras 10, 11 y 12.

OBSERVACIÓN VISUAL DEL MAR DE NUBES DESDE LA TORRE DE BOLICO																
DIAS	7 HORAS				14 HORAS				18 HORAS				22 HORAS			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
	1							X								
2																
3				X												
4																
5	X															
6																
7					X	X			X	X			X	X		
8		X			X								X	X		
9	X					X			X	X			X	X		
10	X	X	X										X			
11			X						X			X				
12			X					X				X				
13	X	X							X	X						
14																
15	X	X							X	X			X			
16	X					X			X			X				
17	X					X	X					X	X			
18	X	X										X	X			
19	X					X	X									
20																
21								X				X			X	
22			X					X				X			X	
23			X					X				X			X	
24	X	X				X			X							
25																
26	X															
27	X	X	X	X					X	X		X				
28	X	X	X	X					X	X		X				
29	X	X	X	X					X	X		X				
30																
31																

Fig. 10. En este modelo de recogida de datos se anotaba una X cuando el vigilante veía que el mar de nubes estaba situado sobre alguno de esos tres lugares o cubría la propia torre. La medición se realizaba a 4 horas del día en ambas torres.

OBSERVACION VISUAL DEL MAR DE NUBES DESDE LA TORRE DE "EL GAITERO"																										
		NIEBLA MOJADORA SOBRE LA TORRE				NIEBLA SECA SOBRE LA TORRE				LLUVIA				SEPTIEMBRE 2009												
		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24	
1																										
2																										
3																										
4																										
5																										
6																										
7																										
8																										
9																										
10																										
11																										
12																										
13																										
14																										
15																										
16	X	X	X	X																						
17																										
18																										
19	X	X	X	X																						
20																										
21																										
22																										
23																										
24																										
25																										
26																										
27																										
28																										
29	X	X	X	X	X																					
30																										
31																										

Fig. 11. En esta tabla se anotaba, mediante símbolos diferentes, hora a hora, si la torre estaba sumida en la niebla, si esta era seca o "mojadora" y si se producía precipitación.

Además, a los pies de ambas torres estaba instalada una garita meteorológica con un termohigrógrafo en su interior que registraba –en una banda de papel– la temperatura y la humedad relativa de aire con la que pudimos analizar el ritmo horario de la niebla (Fig. 13). Además, en el caso de la torre de Bolico se instalaron tres pantallas de 25 cm x 25 cm con diferentes mallas, con la finalidad de colectar el agua de la niebla. Fueron diseñadas por Marzol en el año 2002 y se les puso el nombre de quarter fog collector (QFC) porque su tamaño es $\frac{1}{4}$ de m^2 frente al modelo utilizado habitualmente de 1 m^2 (standard fog collector, SFC) diseñado por Schemenauer y Cereceda, en 1994.

MEDICIÓN DEL AGUA DE NIEBLA EN LAS PANTALLAS (CASA FORESTAL DE BOLICO)						
CAMPAÑA DE VERANO DE 2009						
DIAS	HORA	LITROS			LLUVIA	OBSERVACIONES
		Nº 1	Nº 2	Nº 3		
1	12:00	0'0	0'0	0'0		
2	12:00	0'0	0'0	0'0		
3	12:00	700	800	45		
4	12:00	0'0	1100	0'0		
5	12:00	2'00	2'00	1'00		
6	12:00	0'0	0'0	0'0		
7	12:00	1'00	1'00	0'0		
8	12:00	4'60	2'00	1'00		
9	14:00	0'0	0'0	0'0		
10	14:30	2'00	2'00	1'00		
11	13:00	1'5	2'00	0'5		
12	17:00	1	1	0'0		
13	17:00	0'0	0'0	0'0		
14	11:15	0'0	0'0	0'0		
15	11:30	-1'00	0'0	0'0		
16	11:00	2'00	2'00	1'00		
17	10:30	0'0	0'5	0'0		
18	17:00	0'0	0'0	0'0		
19	16:00	2'00	1'50	0'0		
20	16:00	3'60	2'00	1'00		
21	12:00	1'00	2'00	2'00		
22	12:00	3'50	3'00	2'00		
23	12:00	0'0	0'0	0'0		
24	12:00	0'0	0'0	0'0		
25	16:00	0'0	0'0	0'0		
26	12:00	0'0	0'0	0'0		
27	17:00	0'0	0'0	0'0		
28	12:00	1'5	0'5	0'0		
29	13:00	1'00	0'0	0'0		
30	12:00	0'0	0'0	0'0		
31						

NOTA: Es importante conocer la cantidad exacta de agua recogida en cada episodio de niebla. Para ello, es fundamental saber qué día y a qué hora comienza y acaba la niebla. Es bueno anotar las mediciones todos los días, incluso si no ha entrado niebla (se indica 0,0)

Fig. 12. La finalidad de utilizar diferentes modelos de mallas era estudiar la eficacia de cada una de ellas para, posteriormente, instalar captanieblas de mayor dimensión. Los datos de septiembre de 2009 recogidos por los vigilantes nos indican que no llovió ese mes en las cumbres de Bolico pero que sí se recogieron 126 L/m² en la malla nº1, 120 L/m² en la nº 2 y tan solo 64 L/m² en la nº 3.

No hay duda que la información obtenida de la observación de estas personas es valiosísima para conocer cómo es el mar de nubes desde junio a octubre en estos sectores de la isla de Tenerife. El período temporal disponible es, en el caso de El Gaitero –desde finales de junio de 1998 hasta mediados de octubre de 2018– y en el de Bolico desde mediados de agosto de 1999 hasta septiembre de 2017. En definitiva, se han realizado observaciones del mar de nubes, entre junio y octubre, a lo largo de veinte años en la primera torre y dieciocho años en la segunda torre. Ese tiempo expresado en días son 2.169 días en El Gaitero y 1.816 en Bolico que, contabilizado en horas de observación, son 52.056 horas y 43.584 horas respectivamente. Con este volumen de datos es incuestionable el valor del trabajo realizado por los vigilantes que, además, siempre fue de forma altruista, y la fiabilidad de los resultados obtenidos.

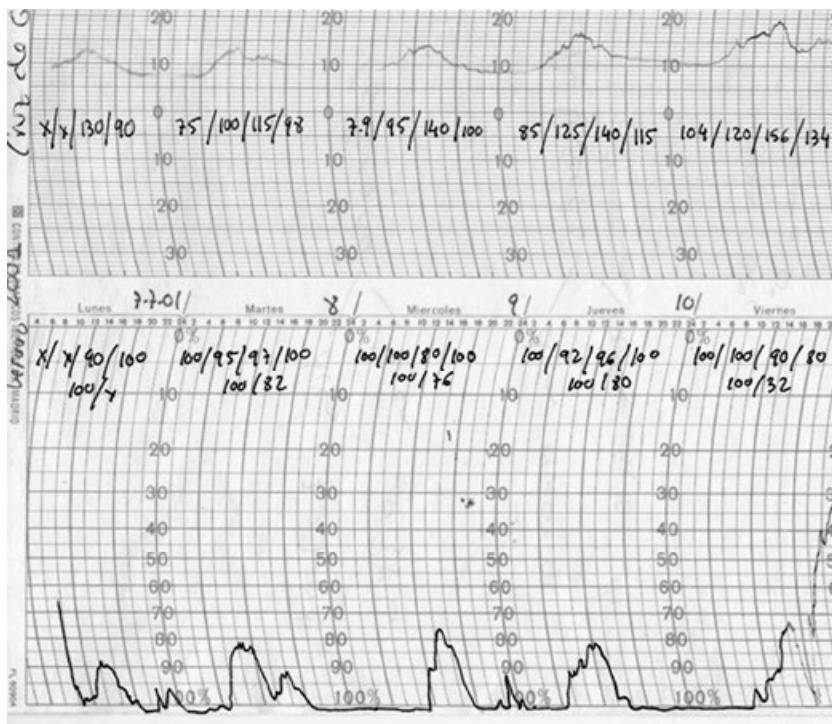


Fig. 13. Las bandas de un termohigrógrafo son una fuente de información meteorológica muy importante, aunque su obtención supone un trabajo tedioso, porque nos dan a conocer hora a hora cómo se ha comportado la temperatura y la humedad. Esta, del 7 al 11 de julio de 2001, muestra que el aire estaba saturado – porque la humedad era del 100%– desde las 18 horas hasta las 6 y las 12 del mediodía durante los cuatro días. Eso indica que la torre estaba sumida en niebla durante esas horas.



Fig. 14. Las imágenes muestran como las vigilantes María Pérez y Fátima Afonso contabilizan el agua colectada por uno de los captanieblas después de un día con niebla en la torre y la segunda realiza el cambio de banda de un termohigrógrafo situado dentro de una garita meteorológica. © M^a V. Marzol.

El valor del mar de nubes

La primera pregunta que cabría hacerse es si en los últimos veinte años la frecuencia del mar de nubes en estas dos cumbres de la isla de Tenerife ha variado. Al observar la figura 15 queda patente, primero, que este fenómeno meteorológico es más frecuente en las cumbres del Noroeste que en la dorsal central de la isla; en segundo lugar, que su presencia estival ha sido desigual en ambos lugares durante los últimos veinte años y, por último, que sí se aprecia cierto descenso de su frecuencia desde el año 1998 hasta la actualidad.

En las tablas 2 y 3 se indica el tiempo de observación en cada torre y el número mensual de horas en los que hubo mar de nubes porque las torres estaban envueltas en la niebla.

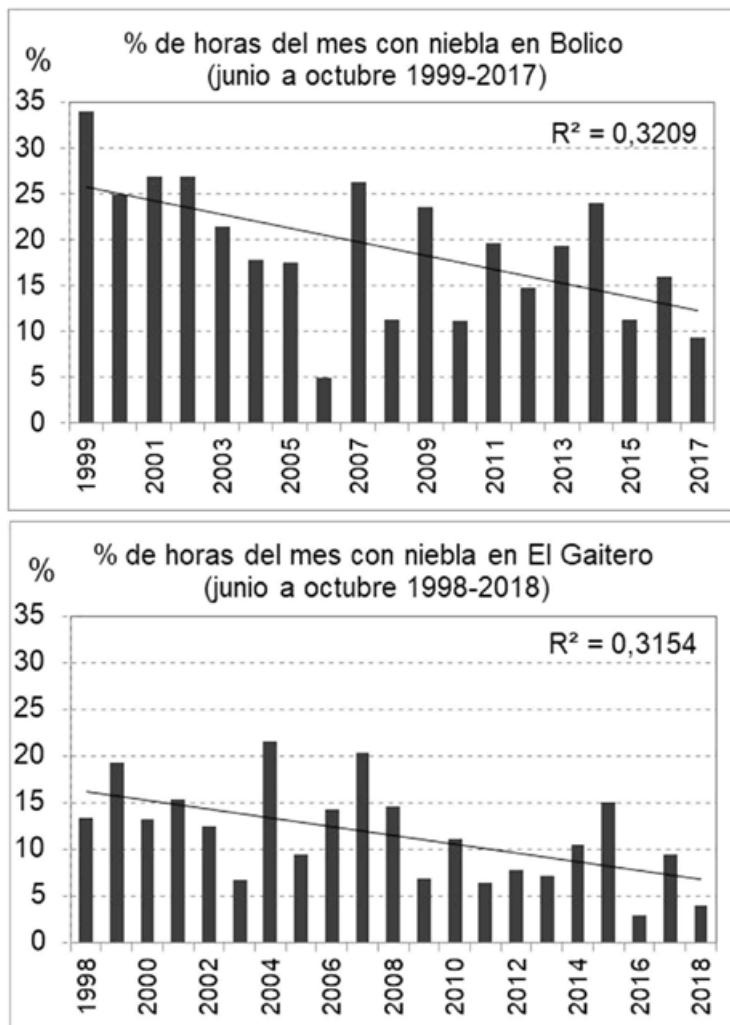


Fig. 15. Porcentaje medio de horas en las que el Noroeste y la dorsal central de Tenerife se encontraban cubiertos por el mar de nubes durante los meses de junio a octubre.

Como se observa, es mayor la frecuencia de las nubes en el Noroeste que en la dorsal central insular y, además, que los meses en los que es más habitual el mar de nubes son los de junio y octubre –al principio del verano y del otoño– en ambos sectores mientras que se reduce notablemente en los meses centrales.

Tabla 2. Número de días y horas observados desde la torre de Bolico y el porcentaje de las mismas en las que la niebla cubría esta torre en el período 1999-2017.

	Nº días observados	Nº horas observadas	Nº horas con niebla en la torre	% horas con niebla
Junio	84	2.016	640	31,5
Julio	452	10.848	1.323	12,2
Agosto	568	13.632	1.861	13,7
Septiembre	570	13.680	2.682	19,6
Octubre	142	3.408	1.047	30,7

Tabla 3. Número de días y horas observados desde la torre de El Gaitero y el porcentaje de las mismas en las que la niebla cubría esta torre en el período 1998-2018.

	Nº días observados	Nº horas observadas	Nº horas con niebla en la torre	% horas con niebla
Junio	145	3.480	328	9,4
Julio	589	14.136	552	4,0
Agosto	616	14.784	843	5,7
Septiembre	558	13.392	2.068	15,4
Octubre	261	6.264	1.445	23,1

En verano es poco habitual que las nubes cubran las cumbres de Bolico y de El Gaitero porque ambas se sitúan por encima de los 1.300 m de altitud, pero esas nubes sí están sobre Teno Alto y El Palmar, en el caso del NW, y en el valle de La Orotava. La explicación de ello es que durante esos meses –julio y agosto sobre todo– la inversión térmica es más baja e impide que las nubes superen los 900 metros de altitud. En la figura 16 se muestra la importante presencia de las nubes en algunos de los sectores en los que se dividió el territorio cuando los vigilantes anotaban información en las tablas (ver figuras 9 y 10). Destacan Teno Alto y El Palmar porque casi la mitad de los días están cubiertos por nubes.

Otro rasgo del mar de nubes que se puede definir a partir de las observaciones de los vigilantes desde las torres es su frecuencia horaria. De esta forma responderíamos a la duda de si el mar de nubes está presente todo el día o tiene unas horas en las que es más frecuente. En general, este tipo de nubosidad es más frecuente a partir del atardecer en cualquier sitio de la isla de Tenerife, incluida en Anaga (Marzol, 2003, 2008).

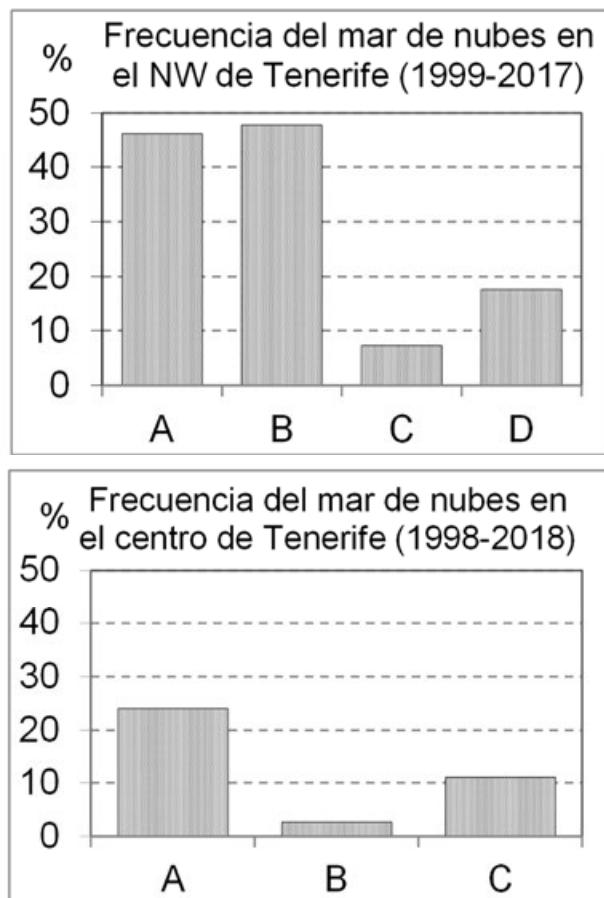


Fig. 16. Frecuencia del mar de nubes en Teno Alto (A), El Palmar (B), Santiago del Teide (C), cumbre de Bollico (D), el valle de La Orotava (A), el valle de Güímar (B) y la cumbre de El Gaitero (C) de junio a octubre en el período de 1998 a 2018.

Cuando el mar de nubes entra en contacto con el territorio insular disminuye la visibilidad horizontal y se convierte en una niebla de advección que deposita o no gotas de agua en la superficie dependiendo de si se trata de una niebla mojadora o seca. Esta fue una diferenciación que los vigilantes realizaban en sus anotaciones (ver figura 11) y gracias a ella podemos distinguir entre el ritmo de un mar de nubes seco –que no deja agua pero si dificulta la visibilidad– de otro mar de nubes “mojador” porque de él se puede colectar agua de forma natural, a través de la vegetación, y artificial a partir de mallas captanieblas. A este fenómeno se le denomina “precipitación oculta”. El ritmo horario de ambos tipos de mar de nubes – seco y “mojador”– es muy diferente y complementario porque mientras que

el primero es más frecuente en las horas del mediodía, el segundo está presente sobre todo desde el atardecer hasta primeras horas del día (Fig. 18).



Fig. 17. Imagen tomada el 1 de julio de 2006 desde la torre de Bolico. En ella se observa cómo las nubes cubren Teno Alto y gran parte de El Palmar mientras que la torre estaba despejada. © M^a V. Marzol.

Finalmente, habría otro interrogante que se podría contestar después de tantos años estudiando al mar de nubes. Es el de ¿cuánta agua puede depositar el mar de nubes en aquellas superficies cubiertas de vegetación con las que intercepta? En este campo estamos investigando desde el año 1996 y ya podemos dar respuestas fundamentadas de cuál es la importancia que tiene el fenómeno atmosférico del mar de nubes para la isla de Tenerife porque aporta, de forma pausada, nada violenta, importantes cantidades de agua que es aprovechada por la vegetación; en concreto, es el monteverde el que más se beneficia por ello por ser a esa altitud donde intercepta la nubosidad con la isla.

Desde el año 2001 hasta el cierre de la torre de Bolico, en septiembre de 2017, para su derribo y la construcción de un radar meteorológico, se ha contabilizado el agua de la niebla depositada en tres QFC con mallas diferentes (ver figura 14). En la figura 19 se presentan los resultados de una de las mallas para dejar constancia de la importancia del mar de nubes

como suministrador de agua en esta época del año, cuando no es habitual que llueva de forma convencional. Se puede afirmar que en estas cumbres se colecta, de media, entre 250 y 300 Litros/m² de agua proveniente del mar de nubes, cada mes del verano, mientras que el agua de la lluvia, registrada en los pluviómetros, no alcanza los 16 mm al mes.

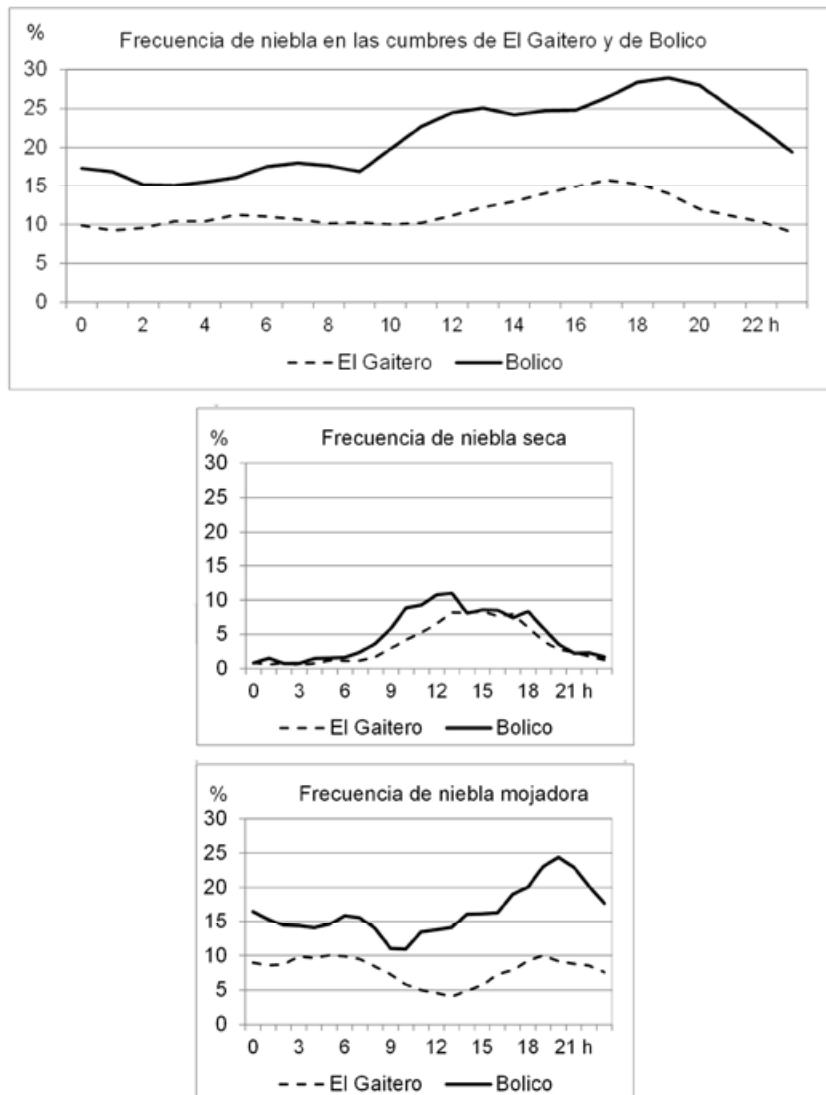


Fig. 18. Aunque el mar de nubes esté presente en las cumbres de Tenerife durante todo el día, si bien con mayor frecuencia a partir de las 18 horas, sabemos que en las horas del mediodía no deposita agua y que sí lo hace desde las 20 horas hasta las 8 h de la mañana. En todos los casos, son las cumbres de Bolico las más nubladas en el periodo de estudio: de junio a octubre de 1998 a 2018.

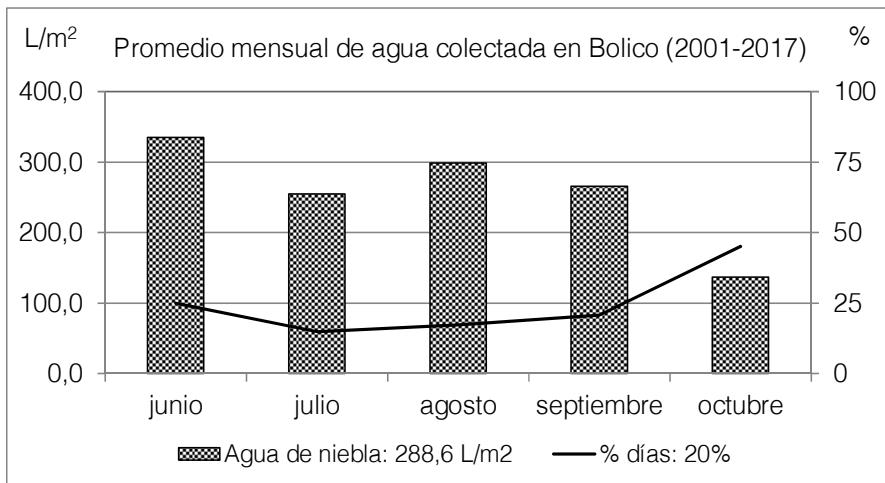


Fig. 19. El volumen de agua mensual depositado por contacto de la niebla con los montes de Bolico es casi de 300 L/m^2 , lo que supone una media de 9 L/m^2 al día de agua suministrada a la vegetación de ese lugar.



Fig. 20. Desde la torre de Bolico es fácil ver cómo al atardecer el mar de nubes desborda por la cumbre y cae hacia el valle de Santiago del Teide. Si es “mojador” depositará importantes cantidades de agua en los brezos de la ladera Norte y en el pinar de la cumbre. © Laura Márquez.

El volumen de agua colectado de junio a octubre en las cumbres de la isla de Tenerife es muy significativo y de gran importancia para el mantenimiento de la cubierta vegetal, no solo porque son abultadas cantidades de agua sino también porque se producen en la estación más seca del año, cuando las plantas tienen estrés hídrico por la falta de lluvias; sin embargo, se ven “regadas” por el agua del mar de nubes. De ahí el importante valor ecológico que tiene el mar de nubes para algunas de las islas Canarias.

Tabla 4. Media diaria de agua de niebla colectada en diferentes lugares de la isla de Tenerife (Litros/m²/día).

	El Gaitero ¹	Bolico	Teno Alto ¹	Anaga ²
Junio	2,8	10,8	6,7	11,3
Julio	1,1	5,1	4,7	22,4
Agosto	0,4	9,6	5,8	18,3
Septiembre	2,3	8,6	6,1	5,1
Octubre	3,7	4,4	7,5	3,6
MEDIA	2,1	7,7	6,2	12,1

¹ Marzol (2003); ² Marzol *et al.* (2011)

Conclusiones

Se sabe que el mar de nubes tiene numerosos detractores porque les impide gozar de un día soleado en una playa norteña, retrasa o cancela vuelos programados en el aeropuerto de Los Rodeos, porque puede convertir en desastre un paseo por el monte, etc. En definitiva, el motivo es que trastoca alguna actividad que habíamos programado con ilusión. Sin embargo, debemos ser conscientes que sin el contacto de ese manto nuboso con algunas de nuestras islas no dispondríamos del magnífico ejemplar de bosque nuboso y húmedo del Monteverde, que es un referente a nivel mundial.

El hecho de que ese mar de nubes dependa de la estacionalidad de la inversión térmica coadyuva a que sus efectos refrescantes y humectantes se produzcan en el momento más seco y cálido del año, los meses de verano. Finalmente, y por ello no menos valioso, el mar de nubes nos deleita con algunas escenas de una belleza sinigual al amanecer en las vertientes orientales, al atardecer en las septentrionales o cuando ascendemos a las cumbres y podemos deleitarnos con el goteo incesante de los pinos y brezos.

Victor Manuel Hernández Beltrán

In Memoriam

Victor Manuel Hernández Beltrán nació en Buenavista el 16 de abril de 1967 y falleció a los 51 años, el 16 de febrero de 2019, también en Buenavista. Toda su vida transcurrió en ese municipio del Noroeste de Tenerife, al que amaba y defendía, trabajando en su finca y cuidando los montes desde la torre de vigilancia de Bolico. Allí fue donde le conocí en el año 1999.

Victor era una persona callada, reservada, pausado, afable –siempre con una sonrisa en la cara–, amigo de sus amigos y muy celoso de su entorno familiar. Él confesaba que le gustaba su trabajo, que era feliz en la torre a pesar de que ello suponía pasar muchas horas y días solo, porque amaba a los montes.

Era muy serio en su trabajo y por eso confié siempre en las observaciones y mediciones que hacía del mar de nubes y de otros rasgos del paisaje norteño que me indicaba. Gracias Victor –desde donde estés– y también a todos los demás vigilantes por vuestra colaboración en el conocimiento de cómo se comporta el mar de nubes en Tenerife. Después de veinte años se lo podemos mostrar a los demás.



Agradecimientos

Mi gratitud inmensurada los vigilantes de las torres contra-incendios de El Gaitero y de Bolico por el valor de su abnegada y silenciosa observación del mar de nubes durante todo este tiempo. Ellos son Alberto

Ruiz, Alicia Martín, Carlos Medina, Carmen Fumero, Cristina Sánchez, David Rodríguez, Elisa Blanco, Fátima Afonso, Francisco Javier Martín, Guacimara Díaz, Gualberto Martín, Ithaisa León, Jana Martín, Jonathan Afonso, Jorge Alonso, José Manuel Armas, José Manuel Guanche, Juana Martín, Jana Trujillo, Laura Márquez, Manuel Yanes, María Pérez, María Sánchez, Natalia Rodríguez, Noemí Pérez, Santiago Campos, Sinforiano Expósito, Sonia Martín, Juana Trujillo, Vanessa Real, Victor Hernández, Victoria González. También a José Mª Sánchez, Jefe de la U.O. de Incendios Forestales y Medios Asociados. Área de Medio Ambiente del ECIT, por su información sobre las torres de vigilancia.

Bibliografía

- DORTA, P. (1995). Las inversiones térmicas en Canarias. *Investigaciones Geográficas* 15: 109-124.
- DORTA, P., MªV. MARZOL & P. VALLADARES (1993). Localisation et fréquence des cellules de pression dans l'Atlantique Nord, l'Europe occidentale et le nord de l'Afrique (1983-1992). *Association Internationale de Climatologie* 6: 452-466.
- GARCÍA PÉREZ, J.L. (1988). *Viajeros ingleses en las Islas Canarias durante el siglo XIX*. CajaCanarias. Santa Cruz de Tenerife.
- GONZÁLEZ LEMUS, N. (1995). *Las islas de la ilusión (británicos en Tenerife. 1850-1900)*. Cabildo Insular de Gran Canaria. Las Palmas de Gran Canaria.
- MARZOL, Mª V. (1993). Los factores atmosféricos y geográficos que definen el clima del archipiélago canario. En Unidad de Geografía del Departamento de Hª y Geografía de la Universidad Rovira i Virgili *Aportaciones en Homenaje al Profesor Luis Miguel Albentosa*. Diputación Provincial de Tarragona: 151-176.
- MARZOL, MªV. (2002). Fog water collection in a rural park in the Canary Islands (Spain). *Atmospheric Research* 64 (1-4): 239-250.
- MARZOL, MªV. (2003). *La captación del agua de la niebla en la isla de Tenerife*. CajaCanarias. Santa Cruz de Tenerife.
- MARZOL, MªV. (2008). Temporal characteristics and fog water collection during Summer in Tenerife (Canary Islands, Spain). *Atmospheric Research* 87: 352-361.
- MARZOL, MªV., P. DORTA, P. VALLADARES, P. MORIN & M. ABREU (1994). La captation de l'eau à Tenerife (Iles Canaries). L'utilisation des brouillards. *Association Internationale de Climatologie* 7: 83-91.
- MARZOL, MªV., P. DORTA, P. VALLADARES & R. PEREZ (1997). Le potential hydrique de la base de la mer de nuages à Tenerife (Iles Canaries). *Association Internationale de Climatologie* 10: 93-101.
- MARZOL, MªV., P. VALLADARES & P. DORTA (2001). Métodos de análisis de la nubosidad: su aplicación a las cumbres de Tenerife (Islas Canarias). En MANERO, F. (coord.). *Espacio Natural y dinámicas territoriales*. Universidad de Valladolid: 250-263.

- MARZOL, M^aV., J.L. SÁNCHEZ, P. VALLADARES, R. PÉREZ & P. DORTA (1996). La captación del agua del mar de nubes en Tenerife. Método e instrumental. En *Clima y agua: la gestión de un recurso climático* (Marzol, M^a V., Dorta, P. & P. Valladares, Eds.). Tabapress. Madrid: 333-350.
- MARZOL, M^aV., J. SÁNCHEZ. & A. YANES (2011). Meteorological patterns and fog collection in Morocco and Canary Islands. *Erdkunde* 65: 291-304.
- MARZOL, M^aV. & P. SUÁREZ (2012). Algunas reflexiones acerca del clima de las islas Canarias. *Nimbus* 29-30: 399-416.
- PICO, B. & D. CORBELLÀ (2000). *Viajeros franceses a las Islas Canarias*. Instituto de Estudios Canarios. Tenerife.
- 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.

2. Estado actual del aprovechamiento del agua subterránea en Canarias

María Pilar García Alonso

*Ingeniera de Minas. MPGA Ingeniería.
email: mpgainingieria@gmail.com*

Las islas Canarias no serían tal como las conocemos sin el sacrificio y esfuerzo de los hombres y mujeres que lucharon para que el agua llegara a sus cultivos y a sus hogares. La agricultura fue el primer paso para que los habitantes de las islas pudieran aspirar a una vida mejor. Posteriormente otras actividades como el turismo han ido sustituyendo en parte al sector primario aprovechando que las instalaciones que alumbran el agua subterránea (galerías y pozos), y los canales de transporte hasta los puntos de consumo, ya se habían desarrollado. En la actualidad, las administraciones están apostando por el agua desalada de mar y por la reutilización de aguas residuales depuradas, que complementan al sistema de alumbramiento y distribución de las aguas subterráneas.

Introducción

Las islas Canarias son islas de origen volcánico. Están situadas en una latitud de 4° al norte del trópico de Cáncer, al oeste del meridiano de Greenwich, a 95 km a la costa africana, y bañadas por los vientos alisios con clima subtropical. Las islas con grandes relieve: Tenerife, La Palma,

Gran Canaria, La Gomera y El Hierro, se ven favorecidas por el efecto de los vientos alisios que en su recorrido por el océano Atlántico recogen humedad de su superficie propiciando el “mar de nubes” que se forma en las “caras norte” de las mismas.

Las islas están sometidas a la influencia de dos componentes de los vientos alisios; los vientos alisios inferiores, frescos y húmedos procedentes del norte y noreste, que actúan entre el nivel del mar y los 1500 m de altitud, y los vientos alisios superiores, cálidos y secos que soplan por encima de los 1500 m y proceden de la circulación general del noroeste en altura. La diferencia de temperatura y humedad entre ambas componentes provocan el fenómeno de inversión térmica, pudiendo existir mayores temperaturas hacia los 2000 m que en las medianías por debajo de la zona de inversión. Esto se produce cuando los alisios inferiores chocan contra las fachadas norte de las islas de grandes relieves y ascienden por ellas, aumentando su humedad y propiciando su condensación. La circulación de los alisios superiores más secos impide que los alisios inferiores sigan ascendiendo a partir de los 1500 m, provocando mayor condensación y la formación del “mar de nubes”. Se producen fenómenos de condensación al contacto con el relieve que origina la llamada “lluvia horizontal” con precipitaciones anuales importantes que marcan la diferencia de paisaje entre las vertientes norte de las islas, verdes y con abundante vegetación, y las vertientes sur, áridas y secas. Las islas de Fuerteventura y Lanzarote al tener menores relieves se encuentran fuera de la influencia de este fenómeno.

Sin embargo, las precipitaciones más abundantes que se producen en las islas proceden de las masas de aire polar marítimo. Estas lluvias se producen porque el anticiclón de las Azores se retira hacia el centro del océano Atlántico, permitiendo que las borrascas del noroeste, se aproximen a Canarias. El aire frío y húmedo que traen consigo provoca que desaparezcan la capa superior del alisio, la inversión térmica y el mar de nubes, por lo que nada impide que se formen nubes de desarrollo vertical que descargan grandes volúmenes de agua.

Si estas borrascas descienden aún más en latitud penetran en las islas por las caras sur y suroeste provocando lluvias de gran intensidad, es lo que en Tenerife se llama “tiempo sur”, “tiempo de La Palma” o “tiempo de El Hierro”.

Otro elemento importante en las islas lo constituyen sus abruptos relieves. Las cotas máximas de las islas varían entre los 671 m de Lanzarote y 807 m de Fuerteventura, islas de menor relieve; 1487 m para La Gomera, 1507 m en El Hierro, islas intermedias; y 1949 m de Gran Canaria, 2423 m de La Palma y los 3718 m de altura que tiene el Teide en Tenerife. Estos relieves son muy elevados, comparados con la extensión superficial de las islas lo que produce grandes pendientes. Todas, menos Lanzarote y

Fuerteventura, presentan unas cumbres centrales dominantes desde las que se desarrollan profundos barrancos que desembocan en el mar.

La orografía de las islas por la desigualdad entre altitudes, la disposición radial de los barrancos y la orientación de las cumbres, ocasiona para un mismo clima subtropical una gran variación de nubosidad, temperaturas, y reparto de lluvias entre unas islas y otras. Igualmente se producen estas variaciones dentro de cada isla, de unos puntos a otros, muchas veces muy cercanos entre sí. Esto da lugar a un conjunto de microclimas que hacen que algunas islas, sobre todo las de mayor relieve, se comporten como continentes en miniatura.

Estos dos factores, clima y relieve, provocan que las precipitaciones sean diferentes entre las islas, lo que deriva directamente en la forma de explotar sus aguas subterráneas, ya que la principal forma de recarga de agua dulce es a través de la lluvia. En este artículo se van a describir las diferentes formas de explotación del agua subterránea, su situación actual y como afrontan el futuro dichas explotaciones.

Explotación de aguas subterráneas en Canarias

Las islas, salvo raras excepciones, no presentan cursos superficiales de agua permanentes. Sin embargo, en el interior del terreno se encuentran materiales rocosos porosos empapados de agua que circula lentamente a través de los poros y las grietas del terreno, desde el interior hacia los contornos de las islas hasta alcanzar el mar. Estas formaciones rocosas se denominan acuíferos y constituyen los almacenes desde los que se alumbra el agua subterránea mediante pozos, galerías y nacientes.

En la figura 1 se observa un croquis simplificado del acuífero general de una isla. Por debajo del acuífero existen materiales impermeables (Complejo Basal) que se depositaron bajo el nivel del mar hace millones de años. Son materiales muy compactados y poco permeables que impiden o dificultan la circulación del agua hacia abajo constituyendo la base impermeable sobre la que se asienta el acuífero. Por encima del Complejo Basal se han depositado materiales cada vez más recientes hacia la superficie, que presentan fracturas y porosidad que permite el tránsito del agua dulce.

El agua dulce se mueve lentamente desde el interior de la isla hacia los bordes de esta en contacto con el mar. Este movimiento se encuentra en equilibrio con el del agua del mar que penetra a través de las rocas hacia el interior de la isla, constituyendo un terreno saturado de agua de mar. La zona donde se mezclan las aguas del acuífero y del mar se denomina interfase y está constituida por agua salobre (mezcla de agua dulce y agua de mar).

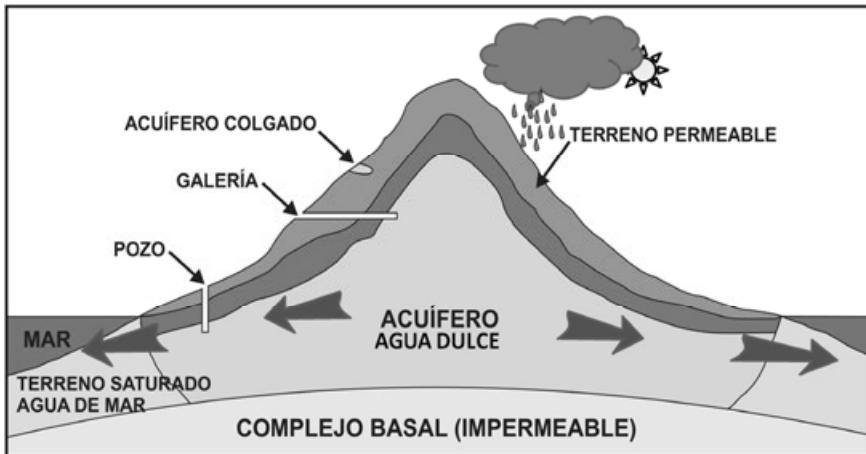


Fig. 1. Modelo simplificado de acuífero general de una isla (elaboración propia).

El elemento principal para que se mantenga dicho equilibrio son las aguas de recarga del acuífero, ya sea por precipitaciones o por “lluvia horizontal”. Cuando se producen precipitaciones, que en Canarias suelen ser torrenciales, solo una parte del agua se filtra al terreno y llega al acuífero, el resto va a parar al mar circulando por la superficie del terreno en forma de escorrentías, o como se dice coloquialmente, “corriendo los barrancos”. Este hecho se ve favorecido por los importantes relieves de algunas islas cuyas grandes pendientes disminuyen el tiempo de infiltración de las aguas y ayudan a que formen torrentes incontrolados que se llevan la mayor parte de la precipitación al mar.

Las islas Canarias no presentan cursos de agua permanentes salvo algún caso aislado, por tanto, la agricultura dependía principalmente de escasos nacientes, y de las precipitaciones que se producían a lo largo del año. Este hecho llevó a sus pobladores a buscar el agua bajo el terreno, inicialmente en zonas con nacientes, y después de forma generalizada por el territorio perforando galerías y pozos. Estas obras de captación de aguas subterráneas se ejecutaban penetrando en el terreno de forma vertical en el caso de los pozos, y horizontal en el de las galerías, hasta “pinchar” en el acuífero, lo que originaba el alumbramiento de parte de sus aguas a través del hueco de la galería. En los pozos una vez alcanzado el acuífero es necesario instalar una bomba para poder elevar el agua a la superficie para su aprovechamiento.

La primeras obras subterráneas se ejecutaron mediante trabajo manual “a pico y pala”, luego comenzaron a utilizarse explosivos, y maquinaria para perforación y extracción de los materiales perforados al exterior de galerías y pozos. Hay varios tipos de galerías, aunque todas tienen una

sección suficiente para poder acceder al interior. **Galerías naciente**, son de pequeña longitud y se excavaron cerca de nacientes o alcanzando acuíferos colgados (aislados de los acuíferos generales de las islas). **Galerías convencionales**, que suelen presentar longitudes entre cientos y miles de metros y alcanzan los acuíferos generales de las islas. **Galerías en trancada** que se encuentran próximas al mar, y se caracterizan porque su tramo inicial tiene un pozo o una rampa de pendiente pronunciada para alcanzar la cota donde su desarrollo horizontal permita alcanzar el acuífero ya en su zona próxima al mar (Fig. 2).

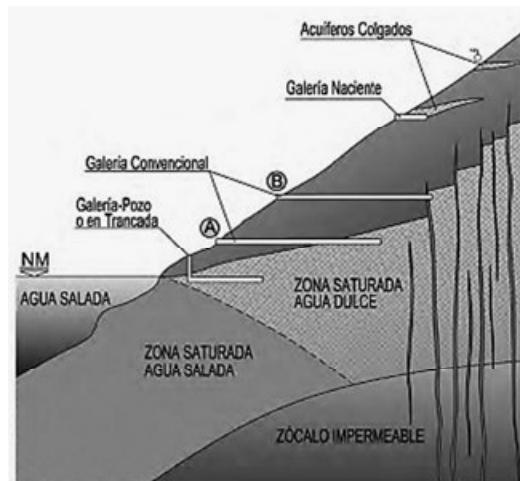


Fig. 2. Tipos de galerías y su situación respecto al acuífero (2011, Manual técnico para la ejecución de galerías).

En cuanto a los pozos existen varios tipos. Los **pozos ordinarios** de pocos metros de profundidad que se perforaban en pequeñas fincas para dar servicio a los cultivos particulares. Los **pozos tradicionales** canarios que presentan profundidades entre decenas y cientos de metros, con diámetros de entre 2 y 3 m, accesibles al interior. Presentan una mayor superficie de captación de agua puesto que se pueden perforar galerías radiales a partir de su eje vertical que captan agua alrededor del pozo (Fig. 3). Por último, los **pozos sondeo** que son perforaciones de pequeño diámetro (hasta 800 mm) y cientos de metros de profundidad a los que no se puede acceder ni perforar galerías radiales.

Otro tipo de perforaciones son los sondeos horizontales de pequeño diámetro (63-75 mm) que se perforan en el interior de las galerías y los pozos tradicionales canarios. Alcanzan longitudes que varían desde las decenas de metros hasta los 150 m permitidos por la administración

hidráulica en este tipo de perforaciones. Sirven para aumentar la superficie de captación al igual que las galerías radiales de los pozos.

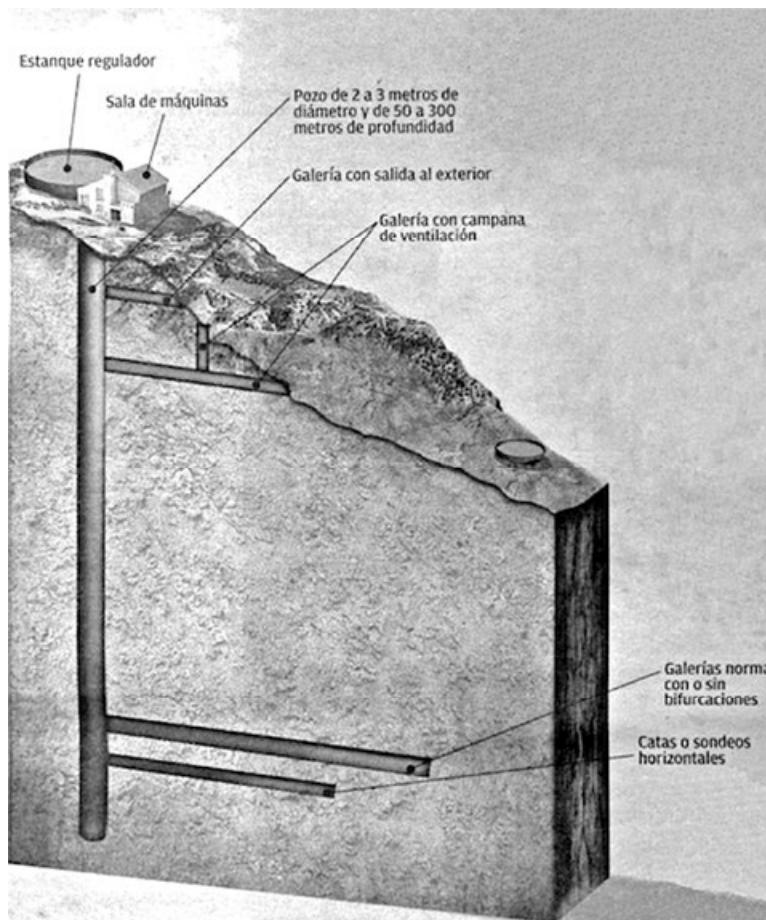


Fig. 3. Pozo tradicional canario.

Con la publicación del Decreto 232/2008, de 25 de noviembre, por el que se regula la seguridad de las personas en las obras e instalaciones hidráulicas subterráneas de Canarias, se exige a las administraciones hidráulicas de cada isla que elaboren un inventario de las instalaciones existentes activas e inactivas, del estado de los accesos y medidas de cierre y seguridad para que solo las personas con autorización puedan acceder a su interior.

En la tabla 1 se muestra el número aproximado de instalaciones existentes en cada isla según datos obtenidos de información pública de los Consejos Insulares de Aguas de las respectivas islas.

Tabla 1. Datos de las instalaciones hidráulicas subterráneas (Consejos Insulares de Aguas).

ISLA	POZOS	GALERÍAS	OBSERVACIONES
LANZAROTE	32	8	Bajo rendimiento y problemas de salinidad
FUERTEVENTURA	2720?		Sin datos precisos del número de instalaciones y valores de extracción.
GRAN CANARIA	2954?	413?	Un elevado porcentaje de pozos están abandonados
TENERIFE	395	1111	El volumen y la calidad del agua extraída varían según zonas
LA GOMERA	132	7	Recursos subterráneos son menos de la mitad del consumo total
LA PALMA	75	162	Grandes caudales alumbrados
EL HIERRO	37	12	Existen pozos con galerías y galerías en trancada

Se observa que las islas de mayor superficie presentan mayor número de instalaciones, destacando Tenerife (Fig. 4) con miles de kilómetros perforados entre galerías y pozos, y Gran Canaria (Fig. 5), por la gran cantidad de pozos perforados, muchos de los cuales están fuera de uso por diversos motivos (agotamiento de las aguas, salinización, falta de rentabilidad por los altos costes energéticos, instalaciones obsoletas, o que se han interrumpido temporalmente y que es muy difícil volver a poner en marcha).



Fig. 4. Distribución de galerías y pozos en Tenerife (2018, Consejo Insular de Aguas de Tenerife).

La isla de La Palma presenta el doble de galerías que de pozos debido su gran desarrollo en altura, alumbrando grandes caudales. En el resto de las islas apenas hay galerías perforadas, siendo mucho más importante el número de pozos.



Fig. 5. Distribución de pozos en Gran Canaria (2017, Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria).

La perforación de pozos o galerías (Fig. 6) se realizaba en los primeros tiempos eligiendo lugares con alumbramientos preexistentes, como fuentes, o nacientes, o simplemente donde se poseían los terrenos para ello, y posteriormente estudiando la geología e hidrogeología para tener mayores probabilidades de éxito, aunque este no estuviera nunca asegurado. En la tabla 2 se contrastan las características de las galerías y los pozos.

Son varias las administraciones que tienen competencias sobre las instalaciones hidráulicas. De la gestión, control y planificación hidrológica, se ocupan los distintos Consejos Insulares de Aguas de cada isla, que son organismos dependientes de sus Cabildos Insulares respectivos. Se encargan de las autorizaciones para investigación y explotación de aguas alumbradas, recopilación de información del estado de los acuíferos a través de los datos (volúmenes, caudales, características físico-químicas de las aguas) que aportan los titulares de las instalaciones, en cumplimiento de la legislación vigente (ley 12/1990, de 26 de julio, de Aguas y Decreto 86/2002, de 2 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Dominio Público Hidráulico Reglamento que la desarrolla) y los sucesivos planes hidrológicos (actualmente vigente el del año 2015).

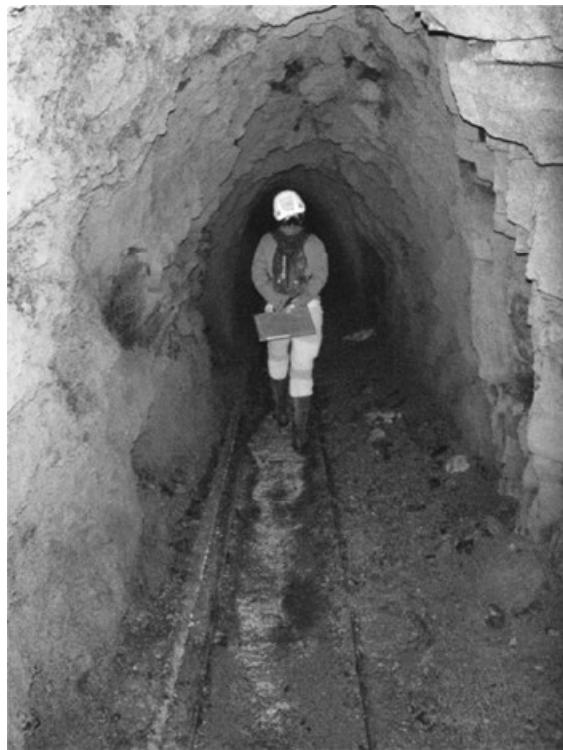


Fig. 6. Sección de una galería (arriba) y caña de un pozo (abajo).

Tabla 2. Comparativa de diversas características de galerías y pozos.

CARACTERÍSTICAS	POZOS	GALERÍAS
Distribución regional	Mayor desarrollo en islas con poca altura (La Gomera, El Hierro, Fuerteventura y Lanzarote).	Mayor desarrollo en islas de cumbres altas (Tenerife, La Palma, Gran Canaria).
Situación en cota	Entre zona de costa y medianías.	Entre medianías y zona de cumbres.
Diseño de la instalación	Perforaciones de cientos de metros con galerías radiales en fondo o a distintas alturas dentro del pozo.	Una galería principal con traza rectilínea que puede cambiar de dirección a lo largo de la perforación, con ramales y subramaes secundarios que parten de la galería principal.
Longitud / profundidad	Pozos tradicionales: superan los 580 m Pozos sondeo: superan los 700 m Pozos mixtos: inicio tradicional - finaliza en sondeo.	Varián entre pocos metros y más de 6000 m: - Aguas de la Matanza (Tenerife): 6320 m - Aguas del Sauzal (Tenerife): 6118 m.
Acceso	Fácil. Se llega en vehículo y puede acceder maquinaria pesada porque necesitan bombas, e instalación eléctrica para extraer el agua y, por tanto, trabajos de mantenimiento.	Difícil. Situadas en cualquier emplazamiento (zonas habitadas, zonas de monte, zonas de barranco). Se construyeron accesos y pistas para los trabajos de perforación, pero no se han mantenido y han sido invadidos por vegetación. Imposibilidad de llegar en vehículo, solo caminando o en caballerías.
Perforación (sección completa)	Muy caro. Se sustituye por perforación de pozo-sondeo más barato.	Muy caro. Se sustituye por perforación de sondeos horizontales más barato.
Transporte de agua	Es necesario impulsar el agua desde el fondo del pozo hasta un tanque regulador (distribución por gravedad) o a una red de riego (distribución por presión).	Se realiza mediante un canal o tubería. El agua circula por gravedad, no necesita impulsión.
Operación y mantenimiento	Costosos de operar: instalación de bomba, tubería de elevación, ventilación, transporte de personal, jaulas y cabrestantes, instalación eléctrica y factura eléctrica	Poco costosos de mantener porque no hay instalaciones. Solamente cuando hay algún problema en el interior de la galería o en el canal de transporte (largas periodos de tiempo sin mantenimiento).
Autorización administrativa	Hasta el nivel del mar.	Una longitud y ramales determinados con rumbos determinados en autorización.

El Servicio de Minas de la Dirección General de Industria y Energía, de la Consejería de Economía, Industria, Comercio y Conocimiento del Gobierno de Canarias, se ocupa de las autorizaciones de ejecución de obras subterráneas y la seguridad de las instalaciones en su interior, a través de los directores facultativos de las mismas.

El control medioambiental lo realizan tanto los Cabildos Insulares actuando como órganos gestores de los paisajes naturales protegidos en sus respectivas islas, y de la Red Natura 2000, como la Consejería de Política Territorial, Sostenibilidad y Seguridad del Gobierno de Canarias a través de la Viceconsejería de Medio Ambiente, y de la Viceconsejería de Política Territorial en los temas de protección del Dominio Público marítimo-terrestre.

Los ayuntamientos tienen entre sus competencias la concesión de licencias urbanísticas y de obra, previa presentación de las autorizaciones pertinentes del resto de administraciones.

Si la instalación hidráulica se encuentra en Dominio Público Hidráulico la administración competente en la gestión del mismo es la Administración General del Estado.

Desde que se perforaron las galerías hasta la actualidad han pasado en algunos casos siglos, en otros decenios. Las normas a las que hoy se encuentran sometidas las instalaciones no existían cuando se ejecutaron las obras de alumbramiento. Estas normas principalmente son el control y planificación hidráulica, la legislación en seguridad en el trabajo, y sobre todo, las medidas de control medioambiental, que han llevado a proteger medioambientalmente muchos de los emplazamientos donde se encuentran situadas las instalaciones, restringiendo, y en muchos casos impidiendo, que se puedan realizar nuevas obras o trabajos de mantenimiento en su interior y exterior. Por ello, las tareas relacionadas con el mantenimiento y mejora de las instalaciones llevan aparejada una burocracia que hace que sea mucho más lento y costoso, o incluso imposibilita llevar a cabo tareas de mejora de los aprovechamientos.

Situación actual de las instalaciones hidráulicas subterráneas

I. Sequía

En primer lugar hay que hablar las condiciones meteorológicas ya que como hemos indicado al inicio de este artículo el estado de los acuíferos de los que proceden los alumbramientos depende directamente de la recarga de los mismos, y esta se produce principalmente por las precipitaciones, ya que la “lluvia horizontal” es un fenómeno más duradero a lo largo del año

pero más local, porque afecta a los acuíferos de la zona donde choca la nube contra el terreno.

La sequía es un problema que ha preocupado a los habitantes de las islas durante generaciones. De hecho la climatología de las islas y la no presencia de aguas superficiales es lo que impulsó a los canarios a perforar pozos y galerías. Una vez que se produjeron los alumbramientos y el abastecimiento de agua estaba asegurado, floreció la agricultura y la demanda de agua aumentó. Ya no había necesidad extrema de agua sino que los aportes conseguidos en las instalaciones subterráneas eran continuos y suficientes. El desarrollo de la sociedad canaria ha sido posible gracias a la conquista del agua y esto viene acompañado de una importante demanda.

Cuando se alumbría agua en una galería el caudal inicial es mayor, con el tiempo disminuye hasta alcanzar un régimen de equilibrio. En algunos casos, los acuíferos han tardado millones de años en formarse (aguas fósiles), en otros, la recarga debida a las precipitaciones se produce en un periodo que se extiende entre varios meses y varios años. Con el paso del tiempo los caudales de pozos y galerías han disminuido lentamente de la misma forma que ha ido disminuyendo el nivel de los acuíferos que los alumbran. En los acuíferos fósiles la explotación de los alumbramientos ha llegado a secar el acuífero en algunos casos, y las aguas no se han podido recuperar por no haber comunicación con las aguas de recarga.

En la década actual en la isla de La Palma se produjeron lluvias importantes a finales de 2010, durante 2011 y principios de 2012. Como respuesta a estas lluvias excepcionales en el año 2013 se produjeron los caudales máximos de muchas galerías y pozos, lo que nos da un periodo de dos años entre que se producen las lluvias hasta que se nota en el alumbramiento de las galerías y pozos en la zona citada. A partir de 2013 las precipitaciones han sido escasas y se está produciendo una sequía que se prolonga ya nueve años. Este déficit de precipitaciones se está notando en la disminución lenta pero continua de caudales de las galerías y en los pozos (Fig. 7).

II. Sobreexplotación de recursos

Otro problema es la sobreexplotación de los recursos. El aumento de la demanda de agua sin tener en cuenta que los recursos son finitos, sobre todo si no se recargan los acuíferos, conlleva la bajada del caudal por agotamiento de los mismos, el empeoramiento de la calidad del agua alumbrada, y la salinización de los pozos próximos a la costa.

En el caso de los pozos se produce un aumento de la concentración del ión cloruro Cl^- en el agua que se extrae. En la zona costera el agua del mar satura los terrenos. Entre el agua dulce que se mueve lentamente del interior

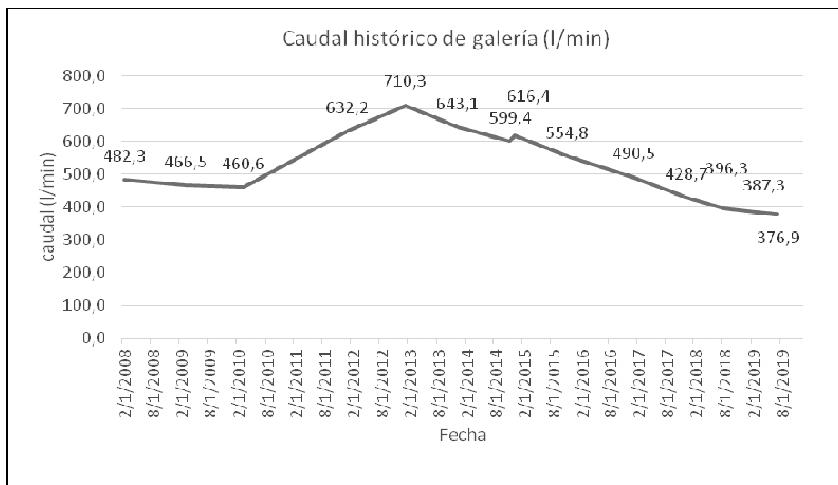


Fig. 7. Caudales históricos en galería desde 2008 hasta 2019.

de las islas hacia la costa, y el agua salada que satura el terreno, se forma una “interfase” constituida por una mezcla de agua dulce y salada (agua salobre). La profundidad autorizada para los pozos es la perforación hasta el nivel del mar con el fin de alumbrar solamente agua dulce. Si un pozo en su perforación “pincha” el agua dentro de la zona de interfase, el contenido en cloruros es muy elevado y el agua no puede ser utilizada para regadío sin tratamiento de desalación (Fig. 8).

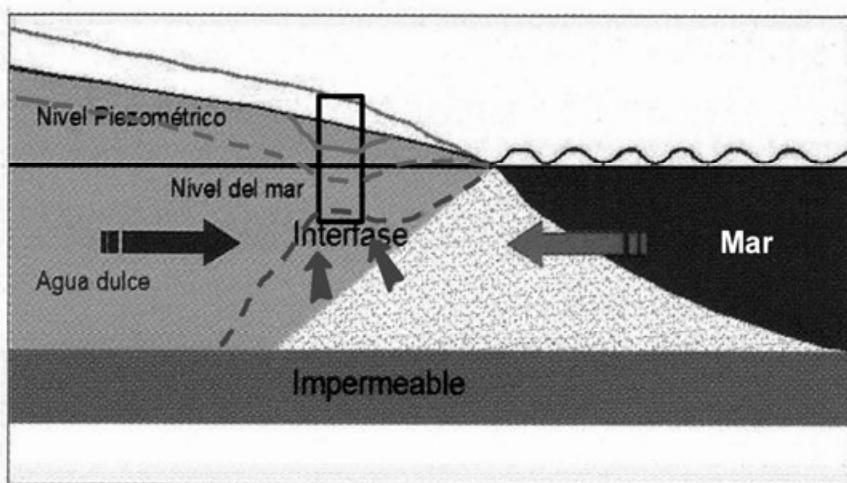


Fig. 8. Salinización de un pozo (2012, Manual técnico para la ejecución de pozos y elaboración propia)

También puede ocurrir que un pozo alumbe agua dulce pero se extraiga más cantidad que la que aporta el acuífero, en este caso el cono de extracción se profundiza y hace que la zona de interfase se aproxime al punto de extracción del pozo, que finalmente extraerá agua salobre. En estas ocasiones es muy difícil volver el pozo a la situación en la que el agua extraída es agua dulce. En la figura 8 se muestra el cono de extracción normal del pozo (trazo continuo), y el desplazamiento del nivel piezométrico y del cono de extracción (trazo discontinuo) cuando hay sobreexplotación, así como el desplazamiento de la línea de interfase (trazo discontinuo).

III. Implantación de nuevos Planes Hidrológicos

Las galerías y pozos se empezaron a perforar en los siglos XVIII y XIX en los lugares donde se creía que se obtendría agua, con escasos trámites administrativos o sin ellos. A mediados del siglo XX con la mejora de la tecnología, el uso de explosivos, y el éxito de los pozos y galerías que habían alumbrado agua, se produjo una avalancha de solicitudes a las administraciones hidráulicas para obtener permisos de investigación para alumbramiento del agua e incluso para extracción de minerales con el fin de perforar pozos y galerías, y obtener el precioso recurso. Con las leyes de 1956 y 1962 las autorizaciones se concedían sin tener en cuenta la proximidad entre explotaciones, lo importante era obtener el agua, aunque si contemplaban algunas medidas de ahorro del agua como la construcción de cierres hidráulicos en el caso de grandes alumbramientos para el mantenimiento del acuífero. Se concedieron muchas autorizaciones para ejecución de las obras aunque muchas de ellas no llegaron a realizarse, quedaron a medio ejecutar, o una vez ejecutadas nunca alumbraron agua.

Con la ley 12/1990 de aguas, se redactó el primer plan hidrológico de 1997, al que ha seguido el plan hidrológico de 2015 vigente en la actualidad, y seguirán los planes periódicos que la Unión Europa exige a sus socios para el control y salud de las masas de agua de sus territorios. La misión de estos planes es entre otras, la protección de los acuíferos, y para ello se aumenta el control sobre las explotaciones existentes, solicitando datos de caudales explotados a los titulares de las aguas, lo que ayuda a tener un conocimiento más exacto de su evolución. Este conocimiento es imprescindible para realizar una planificación y gestión adecuadas, que no solo es necesaria desde el punto de vista medioambiental y de desarrollo de las islas, sino que además es una exigencia de la Unión Europea.

IV. No ejecución de obra nueva

Precisamente para proteger los acuíferos y masas de agua existentes en las islas, se analiza el estado de los mismos en cada isla y en función de los

resultados, se autorizan o no se autorizan nuevos permisos de investigación para alumbramiento de aguas. Por poner un ejemplo, en la isla de Tenerife no se autorizan nuevas explotaciones salvo para abasto público en casos muy específicos. En el caso de que el destino del agua sea para otro uso (regadío, industrial, turístico, etc.) no se conceden nuevos permisos de investigación.

Por otro lado, a pesar de que los medios tecnológicos han evolucionado de forma importante desde que se ejecutaron las primeras galerías y pozos, también se han disparado los costes de las obras (explosivos, personal, gestión de residuos, etc.), de forma que las comunidades titulares de las instalaciones no pueden asumirlos y se limitan a realizar pequeños trabajos de mantenimiento para mejorar el aprovechamiento de las aguas ya alumbradas. Mención aparte tiene el precio de los explosivos que es especialmente costoso por la insularidad, y el monopolio existente en las islas, si comparamos su precio con el que tiene en la península. Además, aunque existen otros medios de perforación como las minituneladoras, no son adecuados para los terrenos volcánicos, porque son muy heterogéneos, y estas perforadoras se diseñan para terrenos de características homogéneas que no varíen excesivamente a lo largo de la excavación.

Pero la mayor dificultad es la actual legislación ambiental que no existía en los años de máximo apogeo de autorizaciones y perforaciones, pero ahora supone en muchos casos la imposibilidad de llevar a cabo trabajos de excavación para nuevos alumbramientos e incluso de mantenimiento de los ya existentes. Las islas Canarias, por su situación, y por su génesis, tienen muchos endemismos, paisajes excepcionales, de alto valor ecológico y medioambiental, así como importantes formaciones geológicas y geomorfológicas. Por ello, más del 50% de su territorio se encuentra protegido e incluido dentro de diversas figuras medioambientales (Red Natura 2000, parques nacionales, parques rurales, paisaje protegido, etc., además de varios entornos que son Patrimonio de la Humanidad). Como ya hemos indicado en anteriores apartados la mayor parte de las galerías están ejecutadas entre medianías y las cumbres en los territorios insulares. Y en muchos casos se encuentran dentro de paisajes protegidos, que son gestionados por los respectivos Cabildos Insulares y por el Gobierno de Canarias, dentro de cuyas competencias está valorar el impacto ecológico que cualquier obra produciría sobre ellos, y por tanto, el poder de no autorizarla.

V. Operación y mantenimiento de las infraestructuras

Existen diferencias entre la operación y el mantenimiento de las galerías y los pozos. Las primeras se encuentran en todo tipo de lugares; dentro de poblaciones, en zonas accesibles por carretera, o en medio de paisajes naturales a los que solo se accede por pistas, generalmente en mal estado, o

caminando. Son instalaciones en las que el agua circula por gravedad dentro de un canal o tubería desde los puntos de alumbramiento en el interior de la galería hasta los puntos de demanda, a veces situados a decenas de kilómetros. Los canales atraviesan paisajes de todo tipo, discurren por paredes, acantilados y barrancos. Las galerías por tanto son de fácil operación ya que el agua sale por la puerta de la galería y se traslada por sí misma hasta los comuneros a través de los canales. Sin embargo, el mantenimiento de las galerías es escaso, y a no ser que haya un gran derrumbamiento en el interior que impida la salida completa del agua a los comuneros no les merece la pena el coste de un mantenimiento periódico (Fig. 9).



Fig. 9. Derrumbe interior de una galería (arriba) y tubería de transporte en mal estado (abajo).

Hay que decir, que muchas veces el problema no está dentro de la galería sino en el canal o tubería de transporte, que se construyó el siglo pasado, y que por derrumbamientos en el interior producen desbordamientos y roturas, o porque pierden estanqueidad o son invadidos por la vegetación, presentan unas pérdidas en algunos casos de hasta el 90% del agua que transportan.

Los pozos presentan una problemática diferente respecto a la operación y mantenimiento, ya que en este caso, sí son accesibles mediante vehículo puesto que tienen instaladas bombas, tuberías, sistema de ventilación, con su correspondiente instalación eléctrica (centro de transformación de media tensión, acometida eléctrica de baja tensión, etc.) para elevar el agua desde el fondo hasta la superficie o el tanque regulador, y luego repartirla por gravedad o mediante red de riego a los titulares del agua.

En este caso tanto el coste de operación como de mantenimiento es significativo e imprescindible para operar. En primer lugar, en los últimos años se ha producido una subida generalizada de la factura eléctrica, que ha obligado a algunos pozos con poco caudal o mala calidad del agua a suspender la extracción. En segundo lugar, muchas bombas están mal diseñadas (se colocaban bombas de mayor caudal que el que puede extraer el pozo), son antiguas, con bajos rendimientos, y las instalaciones presentan baja tecnificación (elementos de control de caudales, medidas de ahorro energético, etc.). Otras veces la potencia eléctrica contratada es muy superior a la necesaria por tener una bomba sobredimensionada, lo que supone un sobrecoste.

Cuando se afrontan las obras necesarias para la mejora tecnológica de las instalaciones hay que aplicar la legislación eléctrica vigente que obliga a sustituir elementos eléctricos antiguos por los que presentan tecnología actual, lo cual supone importantes inversiones.

Por todo ello, el mantenimiento necesariamente es mejor, y el coste operativo mayor que en las galerías. El beneficio que supone la elevación del agua ha de ser superior al coste eléctrico mensual más sus costes de operación y mantenimiento asociados (sustitución de bombas y tuberías, etc.).

VI. Seguridad

El gobierno de Canarias desarrolló el Decreto 232, de 25 de noviembre, que regula la seguridad de las personas en las obras e instalaciones hidráulicas subterráneas de Canarias, que viene a complementar el Real Decreto 863/1985, de 2 de abril, por el que se aprueba el Reglamento de Normas Básicas de Seguridad Minera.

Los elementos más importantes de esta ley son:

- La obligación por parte de los Consejos Insulares de aguas de las islas de elaborar un censo de las instalaciones subterráneas activas e inactivas, y los estados de sus accesos en todas las islas. La mayor parte de las islas lo han realizado con mayor o menor información.
- Las medidas de información y que impiden el acceso no autorizado a todas las personas que se acerquen a estas infraestructuras, ya sea porque no realizan trabajos en su interior, o porque acceden a ellas por estar en lugares de acceso público (Fig. 10).



Fig. 10. Cerramientos de galería.

- Las medidas que aumentan la seguridad de las personas relacionadas con el mundo de las galerías y pozos.
- Y la realización de campañas de cierres definitivos de instalaciones inactivas por parte de los propietarios, y de oficio por parte del Gobierno de Canarias a través del Servicio de Minas, en el caso de las instalaciones abandonadas y de las que no se conozca titular ni propietario de los terrenos donde se encuentre la instalación.

VII. Envejecimiento de las Comunidades de Aguas

La perforación de estas infraestructuras tuvo su máximo auge a partir de los años 50 del siglo pasado. En aquella época muchas personas ahorrraban hasta el último céntimo para poder comprar acciones en galerías y pozos que se estuvieran perforando con el único fin de poder tener agua en propiedad. Tal era la necesidad, que en muchos casos se turnaban las personas de cada pueblo o barrio para ir a perforar personalmente las galerías o los pozos.

A partir de la Ley de Aguas de 1990, solo las obras que se inscribieron en el Registro de Aguas de cada isla pudieron seguir perforando sus galerías si todavía no habían finalizado el expediente autorizado. Los trabajos de perforación fueron disminuyendo poco a poco por diversos motivos, entre ellos, los costes de ejecución, hasta la actualidad en la que muy pocas instalaciones se encuentran en fase de perforación.

Con el paso del tiempo y unos alumbramientos de aguas subterráneas suficientes para las necesidades de las islas, las personas que vivieron los tiempos de la perforación se han seguido ocupando de su gestión y mantenimiento. Sin embargo, a pesar del esfuerzo que supuso para la sociedad canaria la conquista del agua, no ha sabido transmitir su importancia y trascendencia a las generaciones herederas de las instalaciones. Por ello, las Comunidades y Heredamientos de aguas se encuentran que las personas al frente de la gestión de las mismas llegan a ser octogenarias, sin que nuevas generaciones muestren interés por tomar el relevo. Por supuesto, esto no es así en todos los casos, pero si es un problema la transición entre la generación de los constructores de las galerías y pozos, y los que han disfrutado de la bondad de tener agua en sus casas desde que eran niños.

VIII. Falta de empresas especializadas en trabajos de pozos y galerías

Otro problema al que se enfrentan las instalaciones es la escasez de empresas y contratistas que se dediquen al mantenimiento y perforación de instalaciones subterráneas. Este problema es muy importante porque los

trabajos son muy especializados, y en algunos puestos, como es el caso de maquinista de cabrestante o vigilante de interior, o artillero, el trabajador tiene que estar en posesión de un certificado emitido por la autoridad minera. Tal es el caso, que no hay empresas especializadas en todas las islas, y los contratistas de Tenerife y Gran Canaria se desplazan a las islas menores para realizar los trabajos.

Por otro lado, el personal que realiza este tipo de trabajos aprende el oficio trabajando con personas con experiencia, no hay una formación reglada, y en muchos casos se ha heredado de padres a hijos. Actualmente es difícil encontrar gente joven que se quiera dedicar a esta profesión porque es un trabajo peligroso, muy duro, que se realiza a veces en condiciones penosas de calor y humedad, y en el interior de las instalaciones puede haber ambientes con falta de oxígeno o altas concentraciones de gases tóxicos, con peligro de accidentes mortales como ya ha ocurrido en varias ocasiones.

IX. Política hidráulica de las administraciones

El avance de las tecnologías permite que se construyan otras infraestructuras para la obtención de agua dulce como son las desaladoras, y las canalizaciones para la reutilización de las aguas depuradas.

En Gran Canaria, Lanzarote y Fuerteventura las administraciones han apostado hace décadas por la desalación. Ha llegado el momento en el resto de las islas de considerar todas las posibilidades de generación, aprovechamiento y ahorro de agua, porque es un bien imprescindible para la vida tal y como la conocemos, y que a pesar del esfuerzo realizado para conseguirlo, ha sido y sigue siendo derrochado.

Por ello, ahora las administraciones están realizando políticas encaminadas a la mejora de infraestructuras de transporte, de mejora de los aprovechamientos, construcción de desaladoras, redes de transporte de aguas depuradas, etc.

Toda solución que lleve a un mejor aprovechamiento del agua debe ser aceptada, sin dejar de lado las infraestructuras que ya se encuentran en funcionamiento que llevan el agua a los puntos de demanda, sin más inversión que los trabajos de mantenimiento necesarios para conservarlas y mejorar su eficiencia.

Futuro de las instalaciones hidráulicas subterráneas

Desarrollo, mantenimiento y operación

En cuanto a los trabajos de perforación se está sustituyendo la perforación a sección completa de las galerías y pozos por sondeos horizontales y

verticales, que son menos costosos y peligrosos porque no puede acceder personal a su interior. De momento la administración limita la profundidad de los sondeos horizontales en aras de mantener la dirección autorizada de los mismos, para no perjudicar a las instalaciones anexas por desvíos accidentales que hagan que los sondeos penetren en el perímetro de su protección.

Los trabajos de interior de las galerías y pozos se encaminan más a mejorar el aprovechamiento de los caudales ya alumbrados, que a perforar para conseguir nuevos alumbramientos. Esto implica instalación de tuberías, o sustitución de las que están en mal estado, mejora de los puntos de recogida del agua, uso de geotextiles en el interior de las galerías para que los nacientes en forma de goteos no se filtren al subsuelo, etc.

Se están instalando dispositivos (equipos anticalcáreos electrónicos, depósitos de polifosfatos) para evitar la precipitación de las aguas carbonatadas en el interior de canales y tuberías con el fin de que no disminuya su sección y tengan que ser sustituidas cada pocos años, como ocurre en algunas galerías y canales (Fig. 11).



Fig. 11. Instalación de caja con polifosfatos (arriba) y dispositivo anticalcáreo (abajo).

Se tiende a tener un mayor control de los caudales alumbrados y del reparto de los mismos. Para ello, se están sustituyendo las tanquillas aforadoras tradicionales situadas principalmente a la salida de las galerías o pozos y en puntos intermedios de reparto de los canales, por caudalímetros electromagnéticos y contadores que envían información actualizada en tiempo real a un dispositivo digital (teléfono, tableta, ordenador, etc.)

Se están sustituyendo los métodos de reparto tradicionales; tanto el reparto mediante “dulas” realizado por el canalero, como por tanquillas de reparto en las que se divide el agua que alumbría la instalación en tantas acciones como tenga la Comunidad, y se reparte al accionista mediante tubería en continuo el volumen de agua que corresponda al número de acciones de las que es titular, por redes telecontroladas de las que existen buenos ejemplos en la isla de La Palma (Fig. 12).

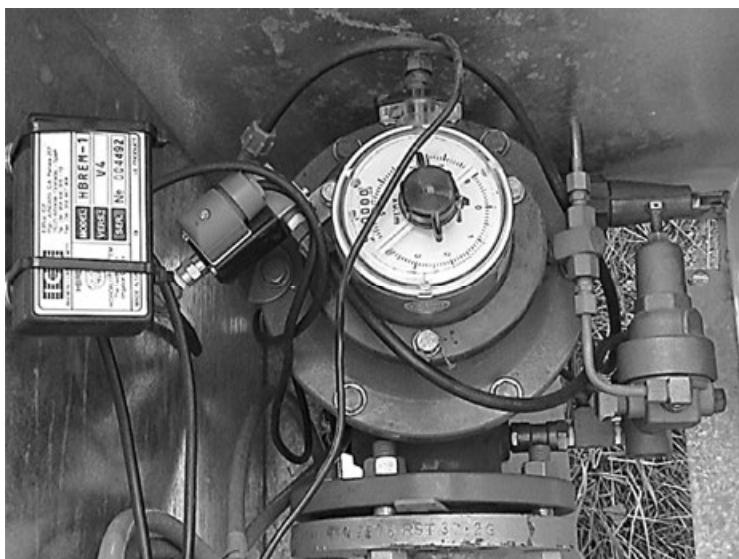


Fig. 12. Contador telecontrolado.

Se están realizando cierres hidráulicos en el interior de las galerías (Fig. 13), con el fin de embalsar el agua tras el cierre cuando no sea necesaria (invierno, época de lluvias), y desembalsar el caudal demandada cuando sea necesario (verano, épocas secas). Es decir, regular la salida del agua en la galería como si del grifo de nuestros hogares se tratara. Se ha demostrado en las galerías que han ejecutado estas obras que con el agua represada tras el cierre en invierno, pueden disfrutar de mayores caudales en períodos de verano o sequía. Y lo más importante es que no se desperdicia el agua que de otra forma se acaba vertiendo en el mar cuando no es necesaria.



Fig. 13. Cierre hidráulico en galería.

También son susceptibles de mejora las instalaciones de los pozos tanto en la operación como en su eficiencia energética. Esto se consigue mediante la sustitución de bombas obsoletas o mal dimensionadas por otras más eficientes tanto hidráulica como eléctricamente, así como por el uso de variadores de frecuencia, que permiten modificar el caudal en función de las necesidades y elevar el agua a diferentes alturas de elevación sin derrochar energía eléctrica.

En cuanto a la operación de la instalación, se tiende a la mejora de los regímenes de bombeo actuales por otros más eficaces (menor consumo eléctrico y mayor protección del acuífero) y manejo en remoto mediante PC o dispositivos móviles.

También se tiende al control del agua alumbrada mediante sondas multiparamétricas en continuo para observar la variación de los iones indicadores de peligro de salinización del agua, así como la medida de la altura de agua dentro del pozo para evitar la sobreexplotación (Fig. 14).

Se plantea el uso de energías renovables (solar, eólica, geotérmica, etc.) así como el cambio de los períodos de elevación del agua a los horarios nocturnos y valle que supone un ahorro importante en la factura eléctrica.

En cuanto a la seguridad de los trabajadores la mejora es evidente gracias al impulso dado por la legislación: Reglamento de Normas Básicas

de Seguridad Minera (RD 863/1985), Decreto 232/2008, de 25 de noviembre, por el que se regula la seguridad de las personas en las instalaciones hidráulicas subterráneas de Canarias y la Ley 31/1995, de 8 de noviembre de Prevención de Riesgos Laborales.

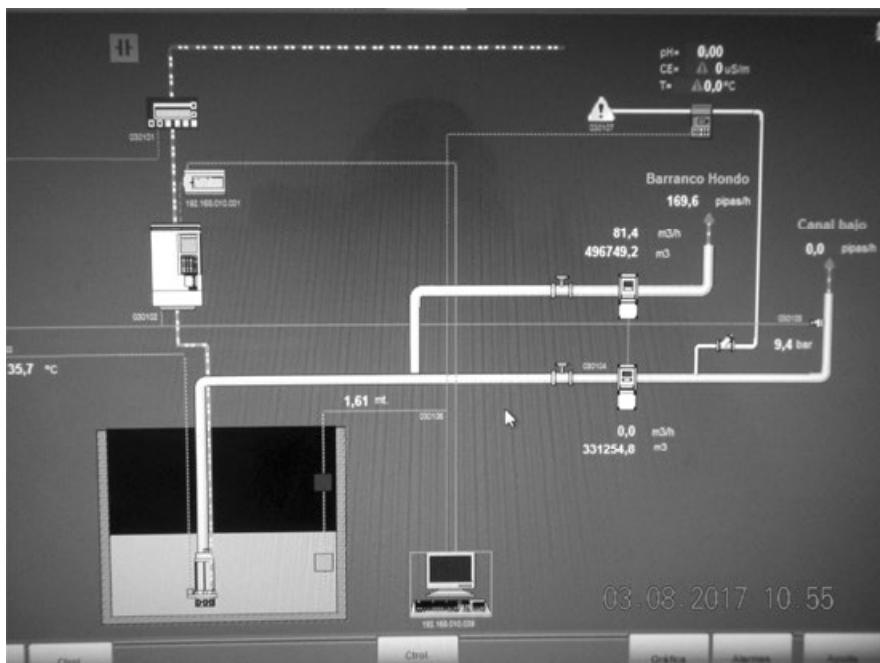


Fig. 14. Pantalla de control de parámetros.

Se ha pasado de utilizar la lámpara de carburo como medio para saber si la instalación tenía gases tóxicos o falta de oxígeno al uso generalizado del detector de gases, mucho más conservador en cuanto la seguridad (Fig. 15). En los pozos se realizan revisiones electromagnéticas de los cables de acero (Fig. 16), y se están sustituyendo los “cacharrones” de transporte de material por jaulas homologadas por la Consejería de Industria.

Los trabajadores reciben formación en temas de seguridad e higiene en el trabajo (formación de trabajo en altura, normas de seguridad, cursos de primeros auxilios, etc.) así como los certificados habilitantes de determinados puestos de trabajo (artilleros, maquinista de cabrestante, vigilante de interior). Las empresas que trabajan en estas instalaciones por su parte, contratan servicios ajenos de prevención.

Además cada instalación debe tener un Documento Sobre Seguridad y Salud donde se recogen todas las características de la misma, sus normas de

seguridad, así como las empresas que trabajan habitualmente en la instalación.

Actualmente, se están llevando a cabo estudios sobre las concentraciones de gas radón en el interior de pozos y galerías, ya que este gas está presente de forma natural en las rocas volcánicas.



Fig. 15. Detector de gases.



Fig. 16. Revisión electromagnética.

Futuro administrativo de las instalaciones hidráulicas subterráneas

Las Leyes de Aguas estatales de 1956 y 1962 permitieron la concesión de muchas autorizaciones para investigación y explotación de alumbramientos de aguas subterráneas.

La Ley 10/1987, de 5 de mayo, de aguas (autonómica derogada poco después de entrar en vigor) y la Ley 12/1990, de 26 de julio, de aguas (autonómica y vigente en la actualidad) han tratado de adaptar el caso especial de la titularidad privada de las aguas en las islas Canarias con la titularidad pública de las aguas a nivel estatal.

Por ello a partir de 1990 los titulares de aguas privadas en las islas tuvieron que elegir entre dos opciones: conservar la titularidad de las aguas alumbradas inscribiéndose en el Catálogo de Aguas de cada isla, o pasar a ser aprovechamientos temporales de aguas privadas mediante la inscripción en el Registro Insular de Aguas de cada isla.

En el primer caso las aguas siguen siendo propiedad del titular que posee los derechos derivados de su autorización de investigación y explotación. Sin embargo, las obras que estuvieran pendientes de ejecutar quedaron caducadas al entrar en vigor la ley, solamente pueden explotar los aprovechamientos ya alumbrados con anterioridad a 1990, y no pueden realizar ningún tipo de obra encaminada a aumentar o recuperar caudales, salvo las de mantenimiento necesarias para el correcto aprovechamiento del agua ya alumbrada. Tampoco pueden disfrutar de subvenciones ofrecidas por la administración hidráulica para labores relacionadas con la instalación o el transporte del agua, ni del perímetro de protección frente a nuevos alumbramientos debidos al avance o perforación de otras autorizaciones que sí se hayan inscrito en el Registro Insular de Aguas.

En el caso de la titularidad temporal de los aprovechamientos, las Comunidades o Heredamientos de Aguas adquieren mediante la inscripción de la obra y los caudales alumbrados en el Registro Insular de Aguas una serie de derechos. En primer lugar la titularidad de los aprovechamientos hasta el año 2040; la continuación de los trabajos de perforación hasta agotar la autorización, así como trabajos de mantenimiento de caudales cuando estos desciendan más de un 5% del caudal inscrito en el Registro; las obras inscritas adquieren un perímetro de protección frente a nuevos trabajos de perforación de otras instalaciones que puedan afectar a sus alumbramientos.

Además las Comunidades pueden solicitar a la administración hidráulica subvenciones para continuar la perforación, trabajos de mantenimiento interior y transporte de agua, sustitución de bombas, tuberías de elevación, instalación eléctrica, equipos de medida y control, en definitiva un conjunto de actividades encaminadas a la mejora de la eficiencia de los aprovechamientos.

Así mismo, las obras que se inscribieron tuvieron un plazo de un año a partir de 1990 para legalizar las obras de perforación ejecutadas fuera de las trazas autorizadas así como los caudales en ellas alumbrados.

La Ley de Aguas dictamina que los aprovechamientos de aguas privados seguirán siéndolo a partir de 2040, cuando se cumpla el plazo de

cincuenta años por el que las obras inscritas en el Registro Insular de Aguas de cada isla han continuado siendo temporalmente privadas. Las obras inscritas en el Registro Insular se transformarán a partir de 2040 en concesiones administrativas de agua pública, y tendrán que cumplir con las condiciones y cánones que se impongan en este modelo de gestión. Sin embargo, a fecha de hoy no se ha previsto como se va a realizar esta transición, ni como la administración va a pasar a gestionar la ingente cantidad de instalaciones subterráneas de alumbramiento y transporte de aguas inscritas en los registros. Es una incógnita que solo el futuro podrá despejar.

Conclusiones

Para que la conquista del agua que tanto esfuerzo supuso a nuestros mayores sea sostenible, es necesario que se produzca el relevo generacional que impulse todas las actividades necesarias para el mantenimiento y aprovechamiento eficaz de este preciado recurso. Hay que mejorar el aprovechamiento, el transporte y la distribución del agua, y fomentar el ahorro. Para ello es necesario un buen mantenimiento y modernización de las instalaciones, acompañado del impulso de las instituciones.

Somos agua, y ella hace que nuestro mundo sea tal y como lo conocemos, tenemos que aprender a valorarla como lo que es, algo imprescindible para la vida. Por ello, todos los medios disponibles a día de hoy son precisos para su obtención, aprovechamiento y el mantenimiento de su calidad. No se puede abandonar los recursos del agua subterránea a favor de otros como la desalación y la reutilización de agua depurada. Todos los medios a nuestro alcance son necesarios ante un futuro incierto en el que el clima, como motor que impulsa la existencia de la vida en la tierra, está en proceso de cambio y contrariamente a lo que solemos pensar no lo podemos dominar.

Bibliografía

DIRECCIÓN GENERAL DE INDUSTRIA. GOBIERNO DE CANARIAS (2011). Manual técnico para la ejecución de galerías.

DIRECCIÓN GENERAL DE INDUSTRIA. GOBIERNO DE CANARIAS (2012). Manual técnico para la ejecución de pozos.

3. Construcción de grandes presas en Canarias: la singularidad de Gran Canaria

Jaime J. González Gonzálvez

*Geógrafo contemplativo de presas.
Vocal colaborador del Comité Nacional Español de Grandes Presas.*

La normativa vigente en España considera que «una gran presa es aquella cuya altura es superior a 15 metros y la que, teniendo una altura comprendida entre 10 y 15 metros, tenga una capacidad de embalse superior a 1 hectómetro cúbico (1.000.000 m³)». En las islas Canarias todas las grandes presas que se han registrado, en función de su ubicación perpendicular al cauce o hincadas en un lateral, lo son por su altura, es decir, «por la diferencia de cota entre el punto más bajo de su cimentación y el punto más alto de su estructura resistente, sin tener en cuenta los rastrillos, pantallas de impermeabilización, rellenos de grietas u otros elementos semejantes».

A pesar de las dificultades técnicas que conlleva cerrar un barranco, en Canarias se construyeron más de 100 grandes presas entre 1900 y 1990. De todas ellas hay que destacar la ejecución de la Presa de Soria en la isla de Gran Canaria (1558 km²), única presa bóveda construida en el Archipiélago Canario y que con sus 132 metros de altura con cimientos ocupa en España el puesto número doce en la relación de las de mayor altura.

Los registros, catálogos, inventarios y relaciones de las grandes presas de embalse, compendios informativos técnicos de lo ejecutado, tienen que ajustar su clasificación en función de sus dimensiones. En el Catálogo Oficial de las presas de embalse con altura superior a los 15 metros del Ministerio de Obras Públicas (1962), primer inventario de grandes presas realizado en España, el número de presas catalogadas en las islas Canarias fue de 48 (31 en Gran Canaria). Según el MOP, «cifra ésta más que suficiente para calibrar la importancia de las obras realizadas en esa parte de la España Insular».

Hasta la fecha hemos registrado 116 grandes presas en explotación en las islas Canarias (75 en Gran Canaria, 24 en La Gomera, 13 en Tenerife, 2 en Fuerteventura, 1 en La Palma y 1 en Lanzarote] y varias presas puestas fuera de servicio en Gran Canaria por rotura (Granadillar), incidente (San Lorenzo) o por el desarrollo urbanístico de la ciudad de Las Palmas de Gran Canaria (Nuestra Señora del Rosario I y II).

Descartada la consulta de los datos de las grandes presas recogidos en los planes hidrológicos de las islas y, especialmente, en el Inventario de presas de Gran Canaria del Consejo Insular de Aguas, por la falta de rigor jurídico, histórico y técnico de estos documentos, la elaboración del registro realizado tiene su concepción en la investigación histórica del patrimonio documental de las presas; en el trabajo de campo; y en el estudio de los datos recogidos a lo largo del tiempo en los registros e inventarios de la International Commission on Large Dams (ICOLD), del Comité Nacional Español de Grandes Presas, del Ministerio de Obras Públicas, de la Comisaría de Aguas, del Servicio Geológico de Obras Públicas y del Servicio Hidráulico de Canarias.

Es incuestionable que la cifra de 120 grandes presas construidas en Canarias constituye la primera singularidad que tienen estas grandes estructuras. En 1964 el propio Ingeniero de Vigilancia de Presas Manuel Alonso Franco recogía en el primer informe realizado por la administración sobre el estado de las presas canarias que «el número de construcciones calificadas en la Instrucción como grandes presas era enorme dentro de Gran Canaria». Sin duda, son el mejor ejemplo de la labor gigantesca de los canarios para poder captar, almacenar y trasvasar el “oro líquido” desde los barrancos hasta los terrenos de cultivo. Dicen que en las islas Canarias la tierra es lo de menos, lo importante es el agua, de ahí el elevado número de obras hidráulicas que hay en las islas.

Construcción de grandes presas en Canarias

La utilidad de asegurar el riego de sus terrenos hizo que los agricultores encargarán a los ingenieros redactar proyectos de grandes presas. Sólo en Gran Canaria se llegaron a diseñar unas 325 grandes presas entre 1862 y el

año 2000, cifra ésta más que suficiente para calibrar la importancia que tiene el patrimonio documental de presas (mapas, planos, memorias técnicas, fotografías, informes, etc.).

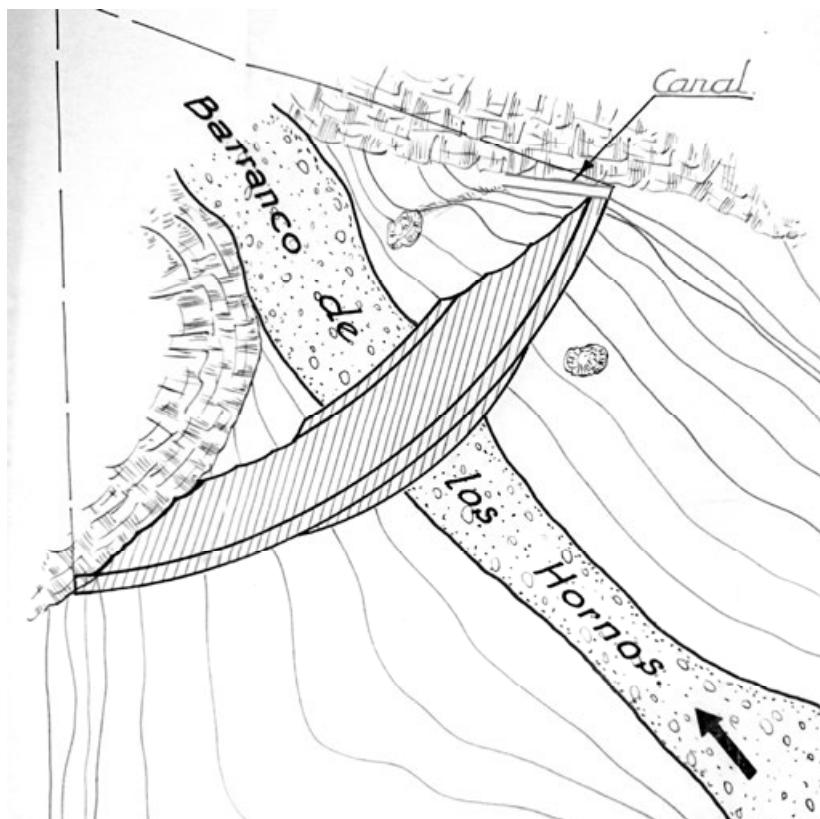


Fig. 1. Plano de planta del crecimiento de la Presa de Los Hornos, un ejemplo del Patrimonio documental de presas (JG).

Por consiguiente, los cientos de proyectos de las grandes presas que no fueron ejecutadas y que se encuentran almacenados en los Consejos Insulares de Aguas tendrían que estar en los Archivos Generales Insulares para su mejor custodia, conservación, inventario, protección y difusión. He aquí por qué en el año 2015 el Diputado del Común (defensor de los derechos fundamentales y libertades públicas de los ciudadanos) le comunicó a todas las administraciones Canarias que «se han de implementar los recursos públicos para la conservación de nuestro patrimonio cultural e histórico, además de superar desde el ámbito público una protección excesiva en el acceso a expedientes y/o archivos

documentales canarios que no parecen la mejor garantía de acercamiento y continuidad de nuestra identidad cultural a otras generaciones». A pesar de que en 2017 el Director de Recursos Hidráulicos del Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria informó al Diputado del Común que «se han enviado expedientes administrativos finalizados al Archivo General del Cabildo de Gran Canaria», hasta la fecha (año 2019) no se ha enviado ningún Proyecto de las presas no construidas, más de 150 proyectos que son *expedientes finalizados*. Con esto está dicho todo de la falta de custodia, conservación, inventario, protección y difusión del patrimonio documental de presas en la isla de Gran Canaria.



Fig. 2. Presa de Granadillar en Gran Canaria (JG)

La construcción de grandes presas en el Archipiélago Canario se inició antes de que se otorgasen las primeras concesiones en el año 1904 para las presas de San Lorenzo (Martinón) y Pinto (La Represa), ambas en Gran Canaria. La necesidad de contar con mayores caudales de aguas con destino a riegos hacía que la excavación de cimientos, los primeros metros del muro y algunas obras accesorias (tomaderos, canales, tuberías, túneles, etc.) se realizaran antes de recibir la autorización de la Jefatura de Obras Públicas de la Provincia de Canarias. Los primeros reconocimientos finales de lo

ejecutado fueron los de La Represa del Pinto (1910) en Gran Canaria, La Vieja presa de los Cocos (1914) en La Gomera y la Presa de Tabares (1915) en Tenerife. El primer incidente ocurrió a principios de siglo durante la construcción del muro de la Presa de San Lorenzo, cuando el agua puso al descubierto una grieta única y de fecha inmemorial. La única rotura de una gran presa en las islas tuvo lugar en Gran Canaria en febrero de 1934 (la terrible Catástrofe del Toscón).

Lo imaginado y lo que finalmente se llegó a construir en las islas, adquiere una mayor relevancia si recordamos lo que escribió en 1862 el ingeniero Juan León y Castillo en el Proyecto de presas de mampostería en el Barranco de Tamaraceite para la formación de pantanos con destino a riegos: «si el ensayo produce estos favorables resultados, se animarán otros muchos a hacer obras semejantes en otros barrancos análogos que se encuentran en la provincia y cambiará la faz de sus costas hoy día in cultas e improductivas. Sin duda alguna del éxito de esta empresa podrá nacer una nueva era para estas islas».

El perfil tipo de las siete presas escalonadas en el Barranco de Tamaraceite (Fig. 3) estaba “equivocado”. Se trataba de un diseño similar al de algunas presas construidas en la primera mitad del siglo XIX en Francia. Un cuerpo de mampostería hidráulica con el talud de aguas arriba escalonado y más tendido que el de aguas abajo, que era casi vertical y liso. Como dicen los ingenieros Díez-Cascón y Bueno en su obra Ingeniería de Presas: presas de fábrica, «sobre la idoneidad de este tipo de perfil basta señalar que girada 180º, es decir con los taludes cambiados, su forma de trabajo hubiese sido mucho más adecuada».

Al final no se llevó a cabo el ensayo, aunque el joven Juan León y Castillo era un ingeniero con visión de futuro. La nueva era comenzó en la primera década del siglo XX con el desarrollo de numerosos proyectos (San Lorenzo, Pinto, Los Cocos, Tabares, Hormiguero, Casablanca, Samsó, etc.) y el inicio de la construcción en Canarias de unas obras que son “algo más que unas estructuras”. Y los terrenos de la costa incultos e improductivos se convirtieron en bellos jardines.

Si el Proyecto de la Presa de San Lorenzo, del ingeniero Juan León y Castillo, ejerció una enorme influencia hasta la década de 1930, podemos entonces asegurar que La Represa del Pinto (Fig. 4), una de las cien grandes presas más antiguas de España, fue la que marcó el camino a seguir por las otras heredades de aguas, las comunidades de regantes o los particulares, al ser la mayor obra hidráulica de las islas Canarias durante muchos años. La explotación de esta obra de ingeniería ha sido un éxito durante más de cien años, por eso mismo este viejo muro de mampostería de cal y todo el murete de mampostería hidráulica que recorre las márgenes del embalse forman una parte muy importante del patrimonio histórico de carácter hidráulico de Canarias y de España.

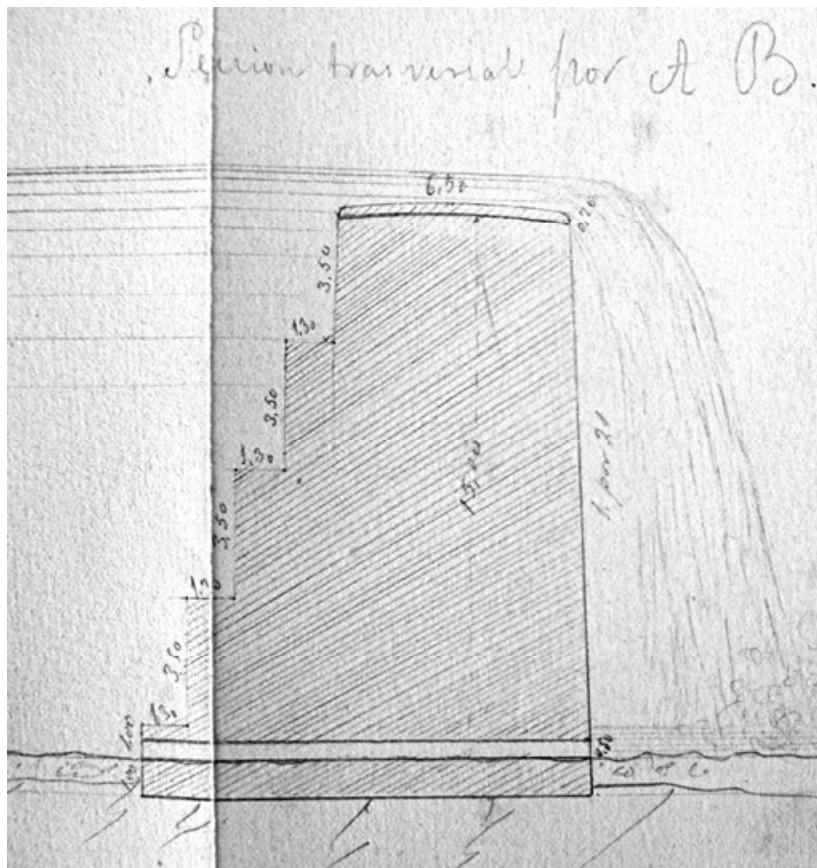


Fig. 3. Perfil tipo presas escalonadas de Tamaraceite (JG)

La Vieja pirámide útil de los Cocos en La Gomera (Fig. 5) tiene más de cien años de utilidad gracias al trabajo con lo que es puramente extenso, la piedra. El peticionario del Proyecto de embalse en el Barranco de Juan de Vera (1910) fue Filiberto Darias. El objeto del proyecto era el de poner convenientemente en explotación una finca de gran capacidad ubicada en la desembocadura del barranco. La cerrada escogida, angosta, estrecha y singular, estaba a 4 km de distancia de los terrenos. Se diseñó una presa con 17 m de altura sobre cauce, mientras que su coronación medía 2,10 m de ancho por 5 m de altura. Cuando el muro sobresalió por encima del promontorio rocoso de su ladera izquierda se modificó su planta con un brusco quiebro hacia aguas arriba. Además, en la construcción final de la coronación se añadió, aproximadamente, un metro más de altura, de ahí la extraordinaria esbeltez que presenta la estructura. Posteriormente se le añadieron dos contrafuertes en la zona del quiebro, posiblemente tras una incidencia durante un llenado.

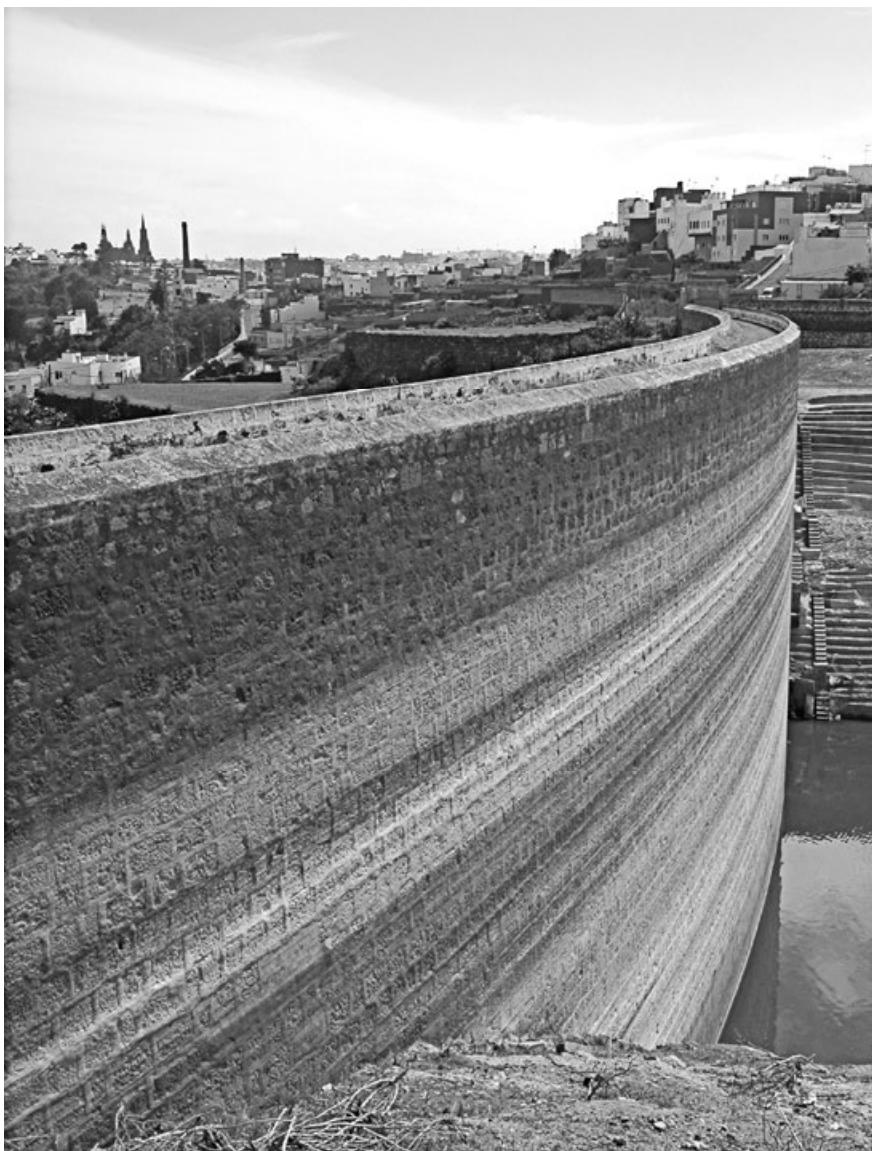


Fig. 4. La Represa del Pinto en Gran Canaria (JG)

En Tenerife la presa más antigua es la de Tabares. Se trata de una presa de mampostería con planta ligeramente curvada que tiene 25 metros de altura sobre cauce y una longitud en coronación de 94 metros. Tal y como recoge el ingeniero Diego Saldaña Arce en su tesis “Presas de mampostería en España”, «el perfil conocido de la presa es triangular, con paramento aguas arriba vertical y talud de 0,4 en el de aguas abajo. Este perfil resulta

claramente inestable, aunque se encuentra parcialmente compensado al situarse el vértice del triángulo bastante por encima del perfil.»

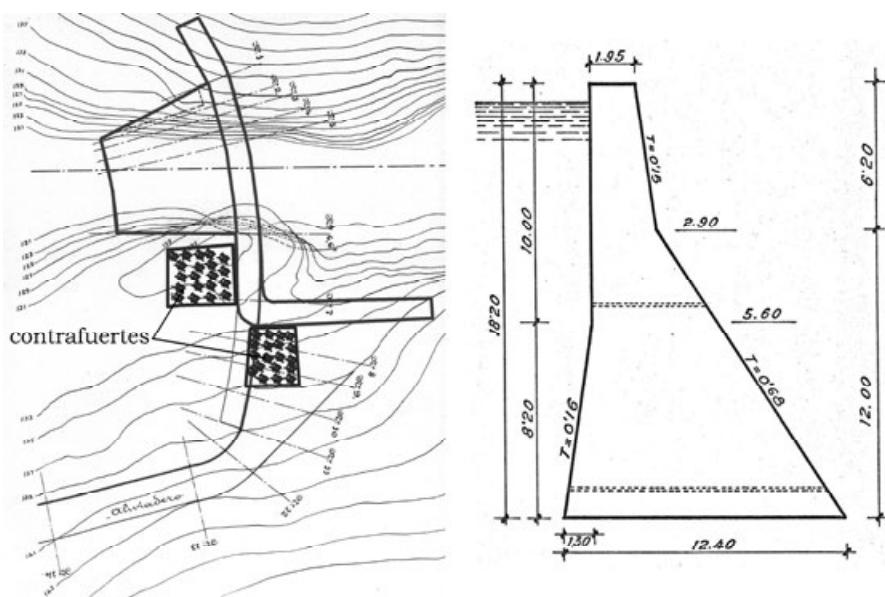


Fig. 5. Planta y perfil tipo de La Vieja en La Gomera (JG)

En 1960, el ingeniero Fernando Ascanio y Montemayor recogió en un informe sobre la estabilidad de la Presa de Hermigua (La Gomera) sus impresiones acerca de las modalidades que se acusaban en la construcción de presas de embalse en las dos provincias canarias. Su descripción de las particularidades que ofrecía la construcción de grandes presas se debía a las «magníficas cualidades de los terrenos de cimentación. Por lo tanto, en Canarias se había llegado a rebasar ciertos principios que en la Península se consideraban como básicos e intangibles».

El cuerpo del muro de la vieja Presa del Pinto fue construido de mampostería con mortero de cal. La impermeabilidad del paramento de aguas arriba se consiguió con un simple enlucido de mortero de cal y cemento porque suprimía las grietas de retracción de fraguado. La Represa adopta en planta una traza ligeramente curva, con una longitud en coronación de 121 m. El perfil de la presa es de gravedad, con talud vertical en el paramento de aguas arriba y escalonado en el de aguas abajo. La coronación presenta una anchura de 4 m. La altura máxima de la presa es de 27 m sobre el cauce, desconociéndose la profundidad exacta de los cimientos. La Represa del Pinto constituyó un resonante éxito que hizo que numerosas comunidades de regantes, heredades de aguas y particulares se

decidieran a construir grandes presas de embalse en las cabeceras de las fincas de plataneras de la costa Norte de Gran Canaria (presas de la Marquesa, Hormiguero, Cardoso, etc.)

La Presa de la Marquesa es, desde el punto de vista técnico, una presa de gravedad de perfil esbelto muy antigua (con más de 85 años de servicio). Este muro de mampostería con mortero de cal, paramentos de sillería (con el de aguas abajo escalonado), planta curvada y con una longitud de coronación de 135 metros, es una de las presas más bellas de Canarias.

En 1906 el ingeniero Germán León y Castillo, hijo del gran ingeniero y presista Juan León y Castillo, firmó un proyecto de presa en el Barranco del Hormiguero (Fig. 6). Se trataba de una presa de gravedad con planta curva y fábrica de mampostería con mortero de cal. El talud de aguas arriba era vertical y el de aguas abajo vertical (3 m) y poligonal. Su ancho de coronación era de 2,5 m, su altura con cimientos de 13 m y su altura sobre cauce 11,80 m. Tal y como se recogió en el Acta de reconocimiento de lo ejecutado, de fecha 25 de marzo de 1913, el muro primitivo se construyó según proyecto. Por consiguiente, la presa primitiva del Hormiguero tiene más de cien años de explotación.

La necesidad de almacenar más agua determinó que los Duarte ejecutaran un recresco *incognitus* del muro, posiblemente en la década de 1940. El paramento de aguas arriba pasó de ser vertical a tener un talud de 0,05 en su cuerpo inferior, mientras que la coronación es vertical (5,55 m) a partir del retranqueo. La altura con cimientos pasó a ser de 17,2 m, mientras que el ancho de la coronación se redujo a 2 m. El escalonado de aguas abajo desapareció con un talud liso de 0,70 [la suma de taludes es inferior a 0,80]. Con embalse lleno su pretil es parte de la forma estructural del muro, cuyo nivel de máximo embalse lo marca en el paisaje su peculiar aliviadero. Otra observación: su planta curvada no es muy pronunciada pero tiene un brusco quiebro hacia aguas arriba en el estribo izquierdo.

Según Alonso Franco, como Ingeniero Encargado de la zona de Canarias de la Dirección General de Obras Hidráulicas (antigua Comisaría Central de Aguas), «las características generales de las presas antiguas de mampostería de cal en Canarias son la planta curva; la sección triangular con paramento agua arriba vertical y talud de agua abajo insuficiente para considerarla de gravedad pura; que muchas carecen de aliviadero y que hay una ausencia de drenaje de la fábrica, de galerías de visita y de desagüe de fondo; y que a pesar de que presentan una capacidad de embalse muy pequeña, tienen en general un gran número de tomas y una amplia galería transversal en su parte baja para la limpieza de sedimentos». En Canarias, algunos elementos como el escalonado del paramento de aguas abajo, y el talud en la zona inferior del paramento de aguas arriba, recuerdan los criterios y procedimientos de cálculo propios del último tercio del siglo XIX.

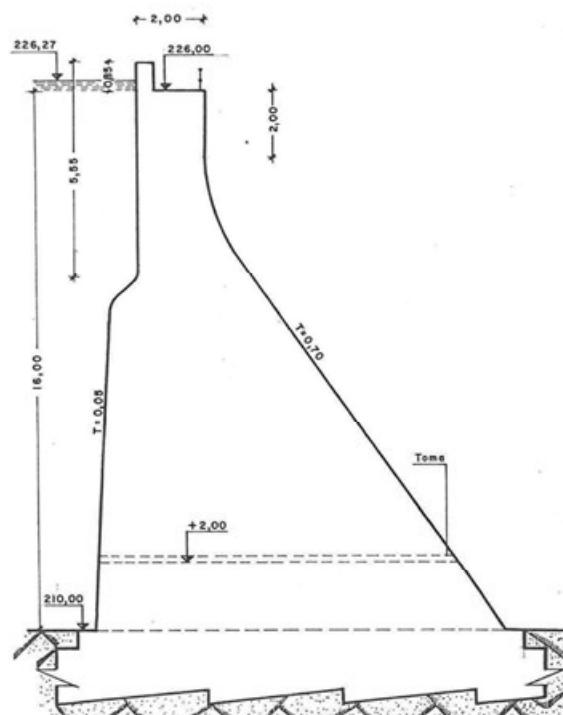


Fig. 6. Presa del Hormiguero en Gran Canaria. Panorámica (arriba), perfil (abajo) (JG)

La Presa Samsó (Fig. 7), innovación constructiva de principios del siglo XX, se construyó en la margen derecha del Barranco de Anzofé, aguas arriba de la Vega de Gáldar (Gran Canaria).

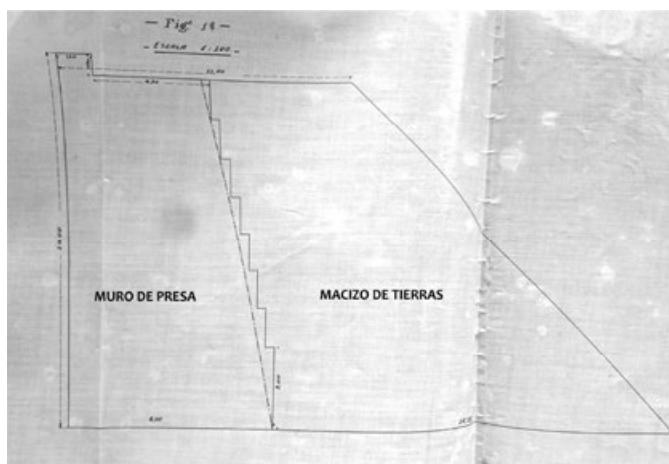
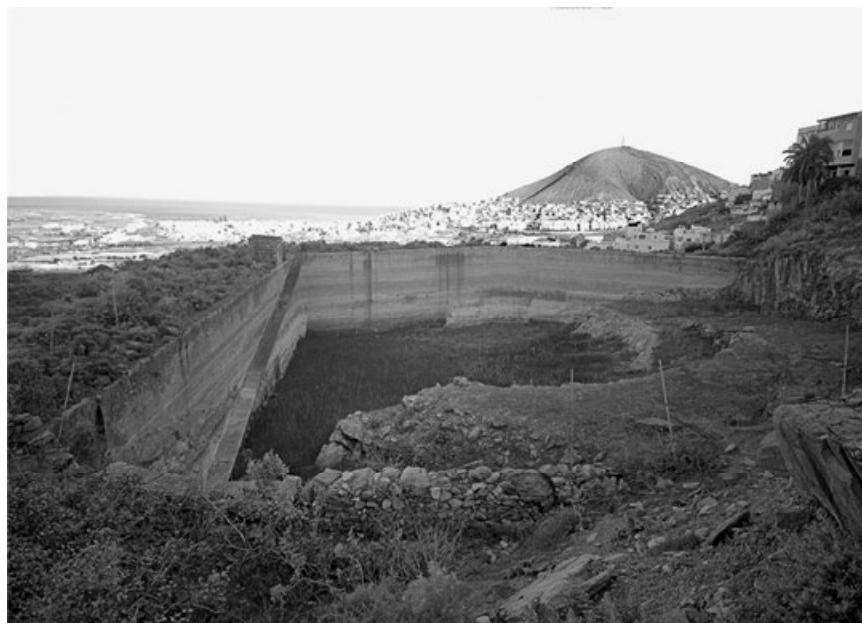


Fig. 7. Presa Samsó en Gran Canaria. Panorámica (arriba), perfil (abajo) (JG)

Esta obra hidráulica de más de cien años, cuyo equilibrio del conjunto lo determina la unidad del muro de mampostería y el macizo de tierras, tiene una planta poligonal de tres tramos rectos con una longitud de

coronación de 142 m. Su vieja fábrica de mampostería con mortero de cal presenta un paramento interno vertical de 14 m de altura sobre cimientos, mientras que su paramento exterior, no visible, es escalonado. Este rígido y sólido cuerpo del pasado, cuya base sobre cimientos tiene 8 m de ancho, presenta un ancho de coronación de 5,50 m, aunque sólo es visible una pequeña parte, al quedar la coronación bajo la capa superior del macizo de tierras adosado al muro durante su construcción (escombrera y estructura). Su pequeño aliviadero está ubicado en el estribo derecho, junto a un pequeño cauce tributario del barranco, mientras que la llave y toma principal se localizan en el muro central de la presa. Otra singularidad que presenta esta grandiosa construcción es la rampa de acceso al fondo: de 60 m de longitud. Al igual que otras presas antiguas dispone de una amplia galería de limpieza de 30 m de longitud que también puede desalojar toda el agua hacia el cauce principal del barranco en caso de accidente inesperado o avería.

Por lo que respecta a los vasos, en casi todas las presas antiguas es común observar revestimientos parciales con mortero de cal y cemento. En los proyectos antiguos las reseñas geológicas por parte de los presistas eran escasas, pero en Canarias si el cauce era permeable se impermeabilizaba. Entre las viejas presas del archipiélago destacan por sus magníficas obras de revestimiento las presas de Molina (Fig. 8), Piletas o Casablanca en Gran Canaria.



Fig. 8. Presa de los Molina en Gran Canaria (ΔΣ Services)

El primer reconocimiento ocular de un terreno por parte de un geólogo, para la construcción de una gran presa, fue efectuado en 1927 por el Catedrático de Geología Lucas Fernández Navarro. La Sociedad City of Las Palmas Water and Power le encargó examinar el Barranco de Cuevas Blancas (Gran Canaria) con miras a construir la presa de embalse diseñada por el ingeniero Felipe Gutiérrez en 1905: un muro de mampostería de perfil triangular de gravedad con 29 m de altura con cimientos (26 m sobre cauce). Fernández Navarro visitó la cumbre insular el día 23 de julio de 1927. En el *Informe acerca de la cuenca de Cuevas Blancas* el geólogo determinó que la cuenca ofrecía excelentes condiciones físicas para el establecimiento en ella, con toda seguridad y sin grandes dificultades, del depósito de aguas superficiales proyectado. Finalmente el Ayuntamiento de Las Palmas proyectó en 1936 un muro de mampostería con planta curva de 24 m de altura sobre cauce (26 m con cimentación). Entrecanales y Távora S.A. inició las obras en 1938, pero al llevarse a cabo la apertura de la caja de cimientos la constructora se encontró entre los acarreos y la roca una capa de arenisca de regular dureza de 7,50 m de potencia en el centro del cauce: tallada en sillares se empleó en la construcción de los pabellones para personal y oficinas. Aunque se presentó una modificación del proyecto para construir una presa de 20 m de altura, con una cimentación ya ejecutada para realizar posteriormente un recrecimiento del muro hasta los 24 m, el muro en construcción se quedó en 1940 con 16 m de altura sobre cauce y una profundidad de cimientos superior a 13 m. En el perfil tipo dibujado y firmado por Entrecanales y Távora S.A. en 1939 se aprecia con claridad la cimentación ejecutada (Fig. 9). Respecto a la capa de arenisca, el geólogo Francisco José Pérez Torrado realizó en 2015 un análisis de la composición y textura de los sillares de arenisca labrados en 1938 por la constructora. Su conclusión fue que «están conformados casi por completo por sedimentos procedentes de los depósitos piroclásticos de oleada de La Calderilla (caldera de origen freatomagnético). El resto del material, en una proporción de hasta un 15 %, procede de la erosión de las lavas fonolíticas del volcán Roque Nublo».

Posteriormente, el Docteur en Sciences Jacques Bourcart elaboró en 1933 el primer informe geológico de la cerrada donde finalmente se construyó la bóveda de Soria en la década de 1960. Bourcart lo hizo para una presa de gravedad con planta curva de 90 m de altura con cimientos. A pesar de que el número de informes geológicos realizados por Bourcart para construir presas fue significativo, en las siguientes décadas todos los proyectos siguieron presentando reseñas geológicas exigüas.

En la década de 1950 el número gigantesco de diseños incrementó de manera notable las visitas a las islas de los ingenieros geólogos de la Asesoría Geológica de Obras Públicas (AGOP) y, posteriormente, del Servicio Geológico de Obras Públicas (SGOP). Sus informes de las

cerradas y vasos fueron cada vez más extensos y de mayor calidad, interviniendo también en las obras en construcción o en explotación.

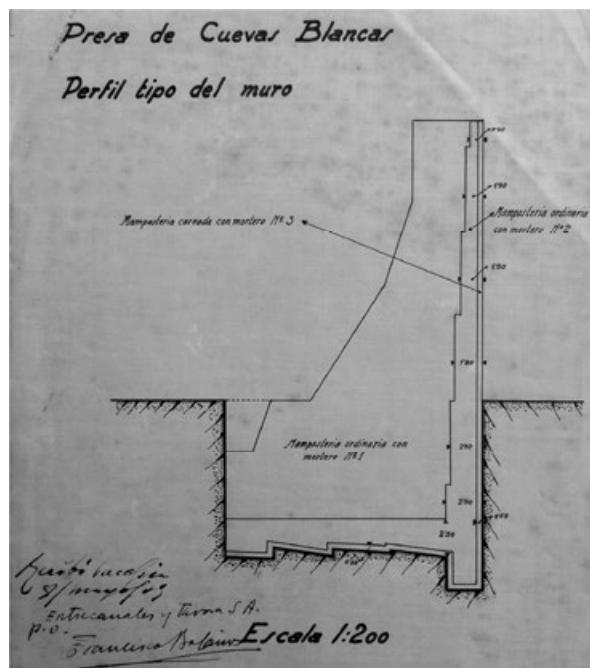


Fig. 9. Presa de Cuevas Blancas. Panorámica (arriba), perfil tipo de 1939 (abajo) (JG)

Respecto a los geólogos de presas de la segunda mitad del siglo XX, merece la pena mencionar los trabajos elaborados por Telesforo Bravo Expósito (Fig. 10) en la isla de Gran Canaria. En 1952 redactó un estudio de las condiciones geológicas generales de suelos y estructuras de la cerrada de un proyecto de muro de presa en el Barranco de Tirajana (Gran Canaria). El trabajo realizado fue muy minucioso: geología general de la cuenca de Tirajana, ignimbritas riolíticas, fallas, estructuras corridas y materiales sueltos, supuesto barranco cubierto, la erosión en los bordes a presa llena, sondeos, impermeabilidad del fondo del embalse, lluvia precipitada en la cuenca y los arrastres, canteras y las conclusiones. Con este informe se justificó en 1970 el cambio de cerrada unos 250 m aguas arriba del emplazamiento primitivo y un nuevo diseño del muro de presa: gravedad del tipo vertedero con perfil Creager en el aliviadero, de hormigón mamposteado y con 41,96 m de altura sobre cauce. Nunca se ejecutó obra alguna. En la década siguiente Telesforo redactó dos informes de la cerrada y vaso de la Presa de Cazadores, pero sólo se llegaron a ejecutar las zanjas de los estribos y el 54% de la cimentación de mampostería hidráulica.



Fig. 10. Telesforo Bravo Expósito, geólogo de presas.

Entre las impresiones aportadas por el ingeniero Ascanio y Montemayor sobre la construcción de presas en Canarias, destacan las tres razones fundamentales por las cuales «no se habían registrado fracasos en unas presas que estaban construidas sin ajustarse a las condiciones exigidas por aquel entonces». La primera de las razones era que «todas las presas antiguas habían sido cimentadas sobre potentes capas de basalto, traquita o fonolita, de gran compacidad, por lo que se evitaba así la subpresión que se presentaría en otros terrenos permeables». La segunda de las razones estaba en que «la iniciativa privada no había acudido a contratistas con medios auxiliares suficientes para terminarlas rápidamente. La construcción de estas obras de artesanía pétreas, por el contrario, había sido lenta, lo que dio lugar a que el mortero de cal tuviera tiempo suficiente para endurecerse al contacto prolongado con el aire». Y por último, que «la ejecución del enlucido con mortero mixto, de cal y cemento, y no de cemento solo, produjo en las presas antiguas una impermeabilidad completa y duradera del paramento de aguas arriba».

El incidente de la Presa de San Lorenzo en el año hidráulico de 1903 – 1904 ocurrió cuando el agua almacenada en un muro en construcción con 12 m de altura puso al descubierto una grieta importante en el terreno: única y de fecha inmemorial según escribió el Ingeniero Jefe de Obras Públicas que autorizó la concesión en 1904. El segundo incidente fue en marzo de 1988, cuando el agua volvió a poner al descubierto la vieja grieta natural. Parece que en el recrecimiento del muro primitivo hasta los 28 m de altura, ejecutado en los años sesenta, no se tuvieron en cuenta los reconocimientos oculares practicados por los ingenieros de Obras Públicas de Las Palmas a principios del siglo XX. La grieta del terreno de principios de siglo pasó a ser en el Proyecto de Recrecimiento (1963) una mala cimentación de la presa primitiva.

Respecto a la *Catástrofe del Toscón*, el 21 de febrero de 1934 tuvo lugar en el término municipal de San Lorenzo (Gran Canaria) la rotura súbita de la Presa de Granadillar (Fig. 11), causando la muerte de ocho personas entre niños y adultos. Las aguas discurrieron violentamente por el barranco destruyendo por completo el Puente de La Hoya (de la carretera que desde Las Palmas conduce a la Villa de Teror), varias casas de mayordomos y algunas fincas de plataneras. Los restos del muro, material que se halla a nuestro servicio, también forman parte de los bienes patrimoniales hidráulicos de Canarias. Según el Diario Republicano Federal «fue una catástrofe provocada por la codicia de quienes miden sus ingresos para el placer por el módulo que señala la entrada de agua en sus represas». A finales de 2011 el ingeniero Diego Saldaña Arce incluyó en su magnífica tesis *Presas de mampostería en España* que «el paramento de aguas arriba podría presentar un ligero talud mientras que el de aguas abajo transmite la impresión de una excesiva esbeltez. La debilidad de la sección se habría

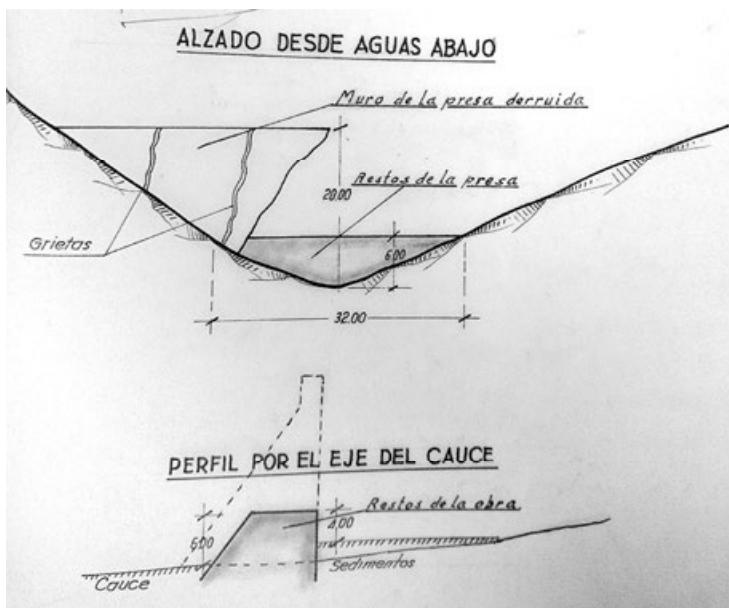


Fig. 11. Alzado y perfil de los restos de la Presa de Granadillar (JG)

visto agravada por el elevado murete que delimita la coronación del lado de aguas arriba, y que claramente parece un añadido de última hora sobre el perfil proyectado». Aunque en la segunda mitad del siglo XX los ingenieros se inclinaron por apuntar que la causa de la rotura fue «*la inestabilidad de sus taludes / insuficiencia de la sección*», el gran presista Julio Alonso Urquijo había elaborado un informe en 1944 para la Jefatura de Obras Públicas de Las Palmas donde indicó que «la presa se fue por no haber ejecutado cimientos». En 1949 el presista de la administración Alfonso Caballero de Rodas y Colmeiro añadió en el Proyecto de Reconstrucción de la Presa del Toscón que «en Febrero de 1934, al llenarse por primera vez, se derrumbó parte del muro, sin duda, porque los cimientos no se habían ejecutado debidamente, y se produciría una socavación que, unida al efecto de la subpresión, produjo el vuelco del muro».

La segunda etapa de construcción de grandes presas de embalse en Canarias surge cuando se comienza a emplear en el cuerpo de los muros de presa el mortero mixto de cal y cemento. La dificultad de adquirir el cemento necesario y la circunstancia de ser las cales de excelente calidad, fue lo que motivó que se empleara este aglomerante con carácter preferente. La Presa de los Pérez en Gran Canaria, con mortero mixto hasta los 30 m de altura y mortero de cal hasta coronación, fue por algunos años la más alta de las islas (45 m sobre cauce).

Uno de los presistas más importantes en Canarias, el ingeniero Julio Alonso Urquijo, explicaba en las memorias de los Proyectos que «el empleo del mortero mixto era para acelerar el fraguado de los morteros de cal en muros de gran espesor, además del aumento de resistencia». También escribió que «adoptaba el perfil ordinariamente usado de presa de gravedad, que debe resistir por su propio peso, exclusivamente, al empuje del agua. Pero que con tal base de cálculo era indiferente que los muros afecten en planta forma recta o curva, pero que siguiendo la práctica más autorizada prefería proyectarlos en arco circular, con lo que se obtenía además un factor más de seguridad». Esto explica por qué hay un número muy elevado de presas con planta curva en Canarias, especialmente en Gran Canaria. Sólo algunas viejas presas de mampostería fueron construidas con planta recta, aunque habían sido previamente diseñadas con planta curva (p.e., Cuevas de las Niñas).

Tras la construcción de la pequeña Presa de los Rajones en 1942 a modo de ensayo, comenzó en 1943 a construirse en lo alto del macizo de Tamadaba un muro de presa con arreglo al perfil tipo de presa de escollera a piedra prendida en el cuerpo de la misma y una pantalla de impermeabilización de mampostería hidráulica y enlucido con mortero bastardo. La Presa de Tamadaba dejó de construirse en 1954 a falta de un metro para su enrase. Esta presa tiene 17,70 m de altura sobre cauce, 19,70

m sobre cimientos y 163 m de longitud de coronación por 6 m de ancho. Se trata de la primera gran presa de materiales sueltos construida en Canarias.

En 1950, los ingenieros José María Valdés y Díaz Caneja, José Luis Fernández Casado y Manuel Lorenzo Blanc, como vocales de la Asesoría Geológica de Obras Públicas, realizaron una visita a Gran Canaria de cara a la construcción de la Presa del Caidero de la Niña (Fig. 12) en el barranco más importante, con gran diferencia, de todas las islas Canarias. Esta visita al Barranco de la Aldea se realizó para dictaminar acerca de las condiciones del terreno donde se iba a construir una presa de embalse que iba a convertirse en un ejemplo bien claro de los beneficios indirectos y cuantiosos que producía en un país una obra bien concebida de aprovechamiento hidráulico.

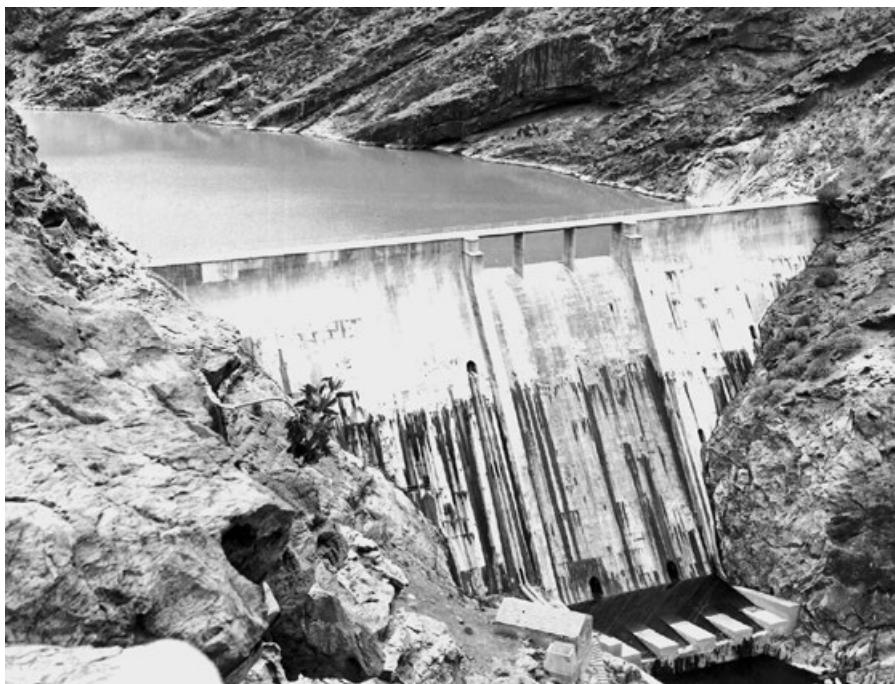


Fig. 12. Presa del Caidero de la Niña en Gran Canaria (JG)

Con la construcción de la presa no sólo se pretendía extender notablemente las tierras de cultivo y mejorar las comunicaciones de la Aldea de San Nicolás con el exterior, mediante la construcción posterior de un “puertito” o el “acondicionamiento o sustitución de la pista del Andén Verde”, sino las del efectivo saneamiento del pueblo al regular y atenuar las avenidas impetuosas del barranco. La situación sanitaria era

verdaderamente lamentable debido a que las charcas del barranco eran la causa de un paludismo endémico y la propagación de las infecciones tíficas. La mortalidad infantil alcanzaba la proporción del 40 por 100.

En 1964 el ingeniero Manuel Alonso Franco destacó que «la Presa del Caidero de la Niña se apartaba de la construcción clásica de presas en Canarias porque respondía a una concepción más moderna». Así, su fábrica era de hormigón en masa con aglomerante de cemento Portland (hormigón mamposteado), tenía juntas transversales de contracción y tres galerías longitudinales de visita e inspección. Su aliviadero de labio fijo tiene tres vanos y está situado en el centro de la presa, dotado de trampolín de lanzamiento. Esta gran presa es de tipo gravedad de planta recta y altura sobre cauce de 46,40 m.

En un informe con fecha de 1962, sobre un proyecto de tres presas escalonadas para el almacenamiento de las aguas procedentes del Túnel de Tejeda (Gran Canaria), el ingeniero José Luis Fernández Casado desconfiaba del hormigón ciclópeo porque «repetidas veces había visto como se convertía en una mala mampostería hormigonada que casi podía calificarse de mampostería en seco». En Gran Canaria las presas de hormigón mamposteado son las de Caidero de la Niña, Fataga, Parralillo, Gambuesa y Candelaria.

Entre 1902 y 1961 se habían construido en Gran Canaria 41 grandes presas de mampostería. La responsable principal de este elevado número de grandes presas era la platanera, la gran consumidora de agua. En segundo lugar quedaba el abastecimiento de la ciudad de Las Palmas y del Puerto de la Luz. Ahora bien, el número de grandes presas construidas en Gran Canaria en sólo 60 años, adquiere más importancia cuando lo unimos al número de estanques (unos 5.000), pozos (unos 800 con 78 km de perforación), galerías (unas 420 con 140 km), minas de agua (más de 100), canales o túneles de transvase (153 km) y tuberías de distribución (534 km). Numerosas empresas hidráulicas que dicen mucho a favor de la laboriosidad insular, especialmente de la iniciativa privada.

En la década de los sesenta no sólo se terminaron muchas presas de mampostería con mortero bastardo (cal y cemento) cuyas obras se habían iniciado en las décadas anteriores [p.e., Presa de Chira en Gran Canaria y Liria en La Gomera (Fig. 13)], sino que se comenzó en 1962 la construcción de la presa bóveda de Soria (hormigón) y se recrecieron algunas presas de mampostería empleando únicamente mortero de cemento, pantalla de hormigón y conductos de drenaje.

En el Inventario de Presas Españolas de 2006 el Ministerio sólo incluyó una gran presa en la pequeña y vieja isla colombina de La Gomera (369 km²): la Presa de Agulo (Presa de la Palmita). Ahora bien, en La Gomera existen 24 grandes presas en explotación. Hacia 1964 se habían construido en La Gomera 7 grandes presas antiguas por los particulares y 7

presas por la Administración. Las presas privadas con planta curvada y mampostería de cal, las más modernas con planta recta y mampostería con mortero de cemento. Todas sin drenaje en su cuerpo y cimentación.



Fig. 13. Presa de Liria sin terminar en La Gomera (JG)

Además de la Presa de los Cocos, las otras grandes presas de mampostería con mortero de cal que fueron construidas por la iniciativa privada en la primera mitad del siglo XX son las de Antoncojo (1920), Tapahuga (1933), Dama (1944), Benchijigua (1947), Cascajo (1947) y Cardones (1953). Respecto a las grandes presas de titularidad pública, todas son de la segunda mitad del siglo XX. La presa vertedero Llano de la Villa (1952), conocida como Charco Tapao, se construyó en una cerrada estrechísima de tan sólo 10 metros. También son presas de mampostería las de Garabato (1953), Palacio (1954), Iscagüe (1957) (Fig. 14), Palmita (1958), Quintana (1961) y Liria (1967). Posteriormente se construyó la presa de hormigón mamposteado de Chejelipes (1970) y las presas de hormigón de La Encantadora (1973) y Los Gallos (1978), así como las

presas vertedero de Los Tiles, La Cuesta, Arialia y Macayo, todas finalizadas a principios de la década de 1990. Las dos únicas presas de escollera que fueron construidas en La Gomera son las de Mulagua – también conocida como La Presa (1981) – y Amalahuigue o Las Rosas (1983). Es incuestionable que la densidad de grandes presas por km² es superior en La Gomera que en Gran Canaria, aunque esta última tiene un número enorme de grandes presas en explotación (75).



Fig. 14. Presa de Iscagüe en La Gomera (JG)

En Tenerife existen 11 grandes presas de mampostería, varias de ellas muy antiguas, presas de Tabares (1915), Cuchillo (1919), Curbelos (1928), Tahodio (1928) y, la singular Presa de Ascanio (1929), construida en un lado del estrecho barranco. La Charca de Ascanio es una presa de 26 m de altura con cimientos de planta ligeramente arqueada, con 118 m de longitud en coronación y 3,2 m de anchura. El perfil es muy esbelto, siendo preciso contar para su estabilidad con el empuje pasivo del fuerte empotramiento en el cimiento. La Presa de Tahodio (Fig. 15), de traza muy curvada y con perfil de gravedad, está ubicada aguas arriba de Santa Cruz de Tenerife. Se desconoce el grado de empotramiento en la roca, pero su altura sobre cauce es singular (40 metros), mientras que la longitud de coronación es de 170 m. Al igual que la mayoría de los muros de presa muy antiguos, Tahodio dispone de una amplia galería de fondo en la parte central de su cuerpo.

El resto de las presas de mampostería de Tenerife se terminaron de construir entre los años 1948 y 1972. Se trata de las presas de Tijoco

(1948), Pasada del Camello (1954), Tamaide (1956) y Ciguaña (1956). Las presas modernas son las de la Granja (1972), Campitos (1975) y Río (1980).

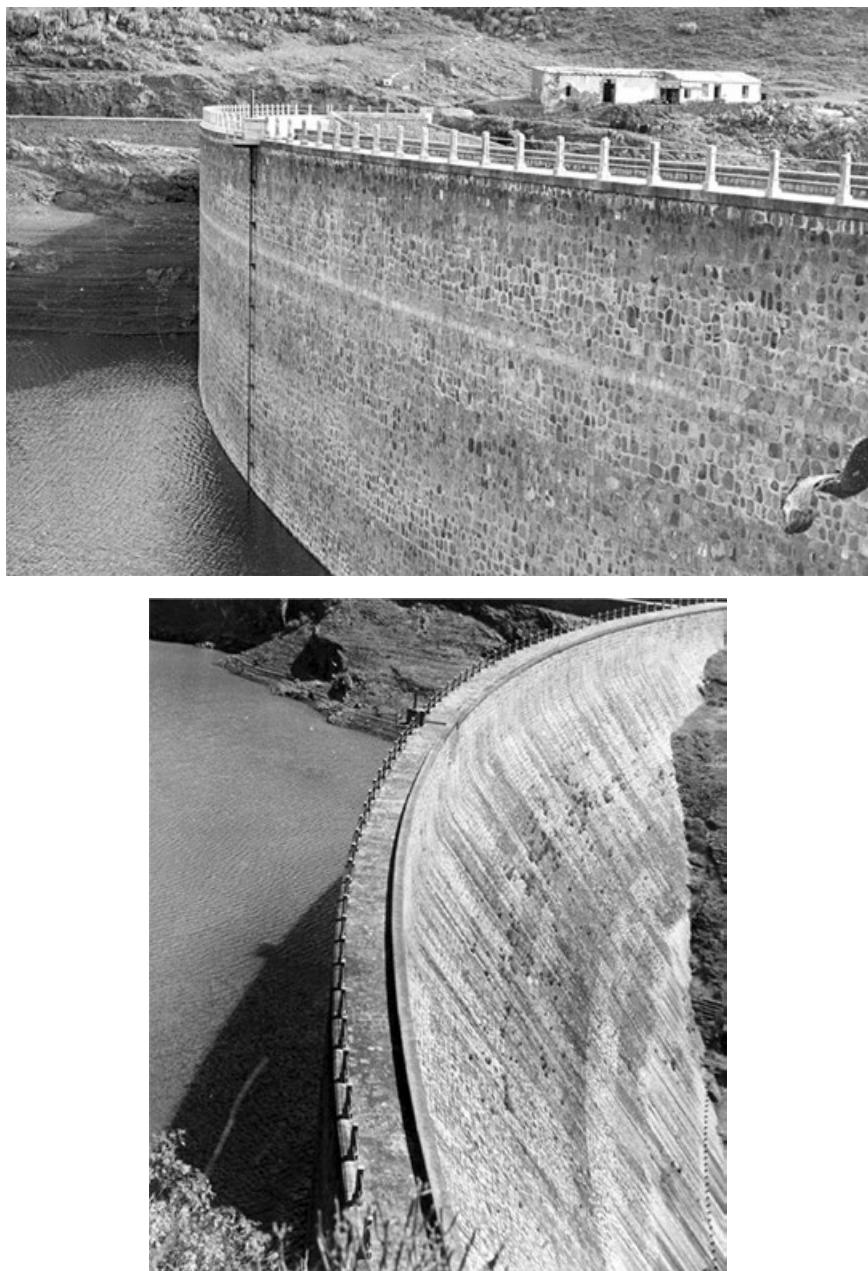


Fig. 15. Presa de Tahodio en Tenerife (JG)

Según los informes de 1964 de Alonso Franco (Sección de Vigilancia de Presas), «en todas las presas de mampostería en Canarias es de presumir que la densidad de sus fábricas tiene un valor relativamente bajo. No creemos que sea una exageración pensar que muchas de estas fábricas tienen densidades que pueden oscilar desde 2,10 a 2,25 Tn/m³». «Una hipótesis más favorable que la posible» dijo el ingeniero José Luis Fernández Casado.

El estudio realizado entre 1970 y 1971 por el ingeniero José Sáenz de Oiza sobre el estado de la Presa de las Cuevas de las Niñas (Gran Canaria) dio como resultado una densidad muy baja de la fábrica, inferior a 2,0 Tn/m³ y próxima a 1,8 Tn/m³. Tras una visita a Canarias, el ingeniero Federico Macau Vilar (SGOP) escribió en una carta «la Cueva de las Niñas no me gustó nada».

El ingeniero Fernando Sáenz Ridruejo dice que a raíz de los informes de 1964, en que Alonso Franco revisó sus condiciones de seguridad, todas esas presas entraron en un camino de racionalidad. Efectivamente, el primer juicio crítico de la estabilidad de las grandes presas de mampostería construidas en Canarias, por parte de los maestros de presas Fernández Casado y Alonso Franco, influyó mucho en el desarrollo de algunos proyectos de grandes presas, así como en la construcción posterior de las presas de hormigón mamposteado con paramentos acabados en hormigón (Parralillo, Gambuesa o Fataga). Pero fue más determinante para los recrecidos con fábrica de mampostería en presas antiguas, por la ayuda que el Estado concedía a los propietarios. Un buen ejemplo lo constituyen los recrecimientos de las presas de San Lorenzo o la Umbría, ambas en Gran Canaria. En cambio, en la Presa del Mulato el recrecido fue con hormigón.

A tenor de los proyectos en construcción y los recrecimientos de algunos muros, así como por la ausencia de galerías de visita, drenaje de la fábrica y desagüe de fondo en las presas construidas con mortero de cal o bastardo con mampuestos con una densidad reducida, los ingenieros en Madrid plantearon en 1966 que «la Administración debía de sentirse preocupada por la seguridad de todas las construcciones con fábricas de mampostería, especialmente en Gran Canaria y La Gomera por el número elevado de presas que entraban en la clasificación de Grandes Presas». La solución general propuesta entonces por Vigilancia de Presas fue la de que «el Estado debía hacerse cargo de su garantía estructural, corriendo a cargo de los gastos de auscultación y refuerzo necesario en aquellas obras cuya propiedad careciera de recursos y de personal técnico idóneo».

En 1972 finalizaba la construcción de la magna Presa de Soria (con proyecto de 1959), una cúpula de doble curvatura de 132 metros de altura con cimientos (Fig. 16). Fue la iniciativa privada, bajo el signo de Fermín Monzón Barber, la que logró construir la única presa bóveda de Canarias, en una estrecha cerrada donde el Cabildo Insular de Gran Canaria había

proyectado con anterioridad una presa de gravedad con planta curva de 90 metros de altura con cimientos (con proyecto de 1930) y una presa bóveda de hormigón hidráulico de pared delgada de 70 metros de altura con cimientos (con proyecto de 1935).



Fig. 16. Presa bóveda de Soria en Gran Canaria (JG)

En 2014 el reportero Mariano de Santa Ana escribió en el artículo *Paseo por la bóveda* que «mientras los paseantes contemplan la conjunción de la presa y su entorno, la mente se interroga si todo ello conforma un

nuevo tipo de monumento. No ya como la escultura clasicista del estribo derecho, ni como el hito que es el propio muro de presa, sino uno de una cualidad distinta. Un monumento que difumina la distinción entre naturaleza y artificio que emanaba de la divinidad: eso que llamamos paisaje cultural».

Hubo un proyecto del ingeniero Saturnino Alonso Vega para construir otra presa bóveda en Gran Canaria, en una cerrada del Barranco de Siberio (1968). La altura sobre cimientos era de 78,50 metros, mientras que la coronación tenía una longitud de 190 metros con un ancho de 5 m. Su volumen de embalse era de 4.800.000 m³. En 1972 la bóveda gruesa fue adjudicada a la empresa Dragados y Construcciones, cuyo delegado en Canarias era el ingeniero Emilio Benítez Pascual, pero finalmente se elaboró un proyecto reformado en 1973 que definía una solución de presa de escollera con pantalla asfáltica en el paramento de aguas arriba y trasladaba la cerrada inicial unos 300 metros aguas abajo. Finalizada su construcción en 1978, su puesta en carga ocurrió de forma súbita durante el temporal extraordinario del mes de enero de 1979.

La tradición oral recoge que la presa de mampostería seca de Tamadaba se vació tras su primera puesta en carga. La repararon inmediatamente. A la Presa de Siberio le ocurrió lo mismo en 1979, tras la rotura inicial del plinto por su escaso dimensionamiento y su mal empotramiento. La estructura fue reparada mediante actuaciones que se prolongaron hasta 1984.

También se construyeron durante la tercera etapa algunas presas de hormigón, como la Encantadora en La Gomera (gravedad) o la de Aríñez en Gran Canaria (contrafuertes), aunque por aquellos años Vigilancia de Presas puso más empeño en el diseño y construcción de presas de materiales sueltos. Dice Alonso Franco que «en Canarias se les negaba su oportunidad bajo la creencia de que el talud de su paramento mojado restaba capacidad a la ya exigua de sus vasos». Ya dijimos al principio que en Canarias la tierra es lo de menos, lo importante es el agua.

La mayoría de las grandes presas de materiales sueltos construidas en Canarias son de escollera con una pantalla en el paramento de aguas arriba, pero en Gran Canaria se construyó en la embocadura de la Caldera de Tirajana un espaldón resistente de acarreos del barranco con un núcleo impermeable de arcillas que llega hasta la roca firme del cauce. En el magnífico artículo *Utilización de materiales pliocuaternarios en presas de materiales sueltos* (1976), los ingenieros Gómez Laá, Alonso Franco y Romero Hernández resaltaron que «Tirajana es una presa de escollera que aprovecha la plana aluvial para espaldones y un coluvión arcilloso procedente de los basaltos, para la impermeabilización». En uno de los libros del ingeniero José Luis Fernández Casado se puede leer lo siguiente: *éxito (hay pocos comentarios) observar que el núcleo es central,*

TIRAJANA. Parece que las portentosas filtraciones de la presa afloran en la Mina de agua Cuesta Garrote.

El muro construido en el Barranco de Tirajana (Fig. 17) es una obra de arte, producto del trabajo colectivo de un grupo de ingenieros de presas que dejaron volar la imaginación para conseguir cerrar el drenaje de la Caldera de Tirajana. La altura con cimientos de esta estructura es de 72,25 metros (42,25 m sobre cauce). Su coronación tiene 170 metros de longitud y 9,40 m de ancho. Hay que decirlo con toda precisión, porque así lo dijeron los maestros de presas: *la imaginación de presas se compone de conocimiento acumulado y audacia, mientras que su explotación debe ser compatible con lo posible y lo seguro.*



Fig. 17. Presa de Tirajana en Gran Canaria (JG)

El conjunto de grandes presas canarias, sometidas a procesos de deterioro, está envejeciendo notablemente y muchas de las presas existentes son antiguas y, por lo tanto, más necesarias de vigilancia y control. He aquí, pues, que muchas de las 116 grandes presas en explotación en Canarias tienen una más que notable singularidad de edad. Por consiguiente, si el tiempo sólo puede comprenderse en el terreno de la historia, podemos entonces determinar que en el archipiélago algunas grandes presas en funcionamiento son muros muy antiguos, mientras que otras muchas presas son antiguas porque superan los 60 años de funcionamiento. Respecto a la

población, muchas de las grandes presas están ubicadas aguas arriba de asentamientos pequeños, medianos y grandes, pero también de importantes hábitats naturales, propiedades, infraestructuras esenciales, yacimientos arqueológicos, etc.

En Gran Canaria la edad media de las 75 grandes presas de embalse en servicio supera los 65 años, siendo menor en las otras islas. Respecto a las cifras, en las islas 8 grandes presas superan los cien años de explotación, 20 presas los ochenta años y 56 muros tienen más de sesenta años de servicio. Además, algunas presas con edades que superan los cincuenta años son muros de mampostería antiguos que se terminaron de construir o fueron recercidas en la década de 1960. En definitiva, el número de presas antiguas en las islas es enorme. Dicen los ingenieros que «las estadísticas basadas en la historia de las presas pone de manifiesto la posibilidad de que cada año se produzca el fallo de una o varias presas en el mundo, fallos que se acentúan con el envejecimiento de las mismas».

Para que la seguridad de presas sea eficaz es necesario hacer inventarios completos y realistas de las grandes presas; clasificarlas en función del riesgo potencial que pueda derivarse de la rotura o el funcionamiento incorrecto de las mismas, contando con la sociedad; y atender en primer lugar a las de alto riesgo, independientemente de la titularidad. Por lo tanto, no parece adecuado copiar datos de trabajos antiguos para elaborar inventarios de grandes presas con errores significativos (como p.e., el Inventario de Presas del Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria del año 2010); ni dejar la gestión de la seguridad de las presas al exclusivo juicio de un funcionario local, al margen de su categoría técnica y del apoyo recibido de ingenieros empresarios externos de ámbito local o nacional. La falta de transparencia y participación aumenta los riesgos de incidencias o rotura de las presas en Canarias.

Es incuestionable que la clasificación de las presas en función del riesgo potencial, con el objetivo de determinar las exigencias de seguridad, conlleva tener en consideración el punto de vista de los colectivos afectados aguas abajo de las presas. La sociedad exige transparencia en la toma de decisiones relacionadas con la seguridad y los niveles de riesgo asociados a las grandes presas, pero en las islas Canarias la primera clasificación de las presas en función de su riesgo potencial, por parte del Cabildo de Gran Canaria, dejó a la población que vive aguas abajo de sus grandes presas fuera de las propuestas de clasificación [p. e., la Presa de Chira (Fig. 18)]. Un grave error, si tenemos en cuenta que en Gran Canaria existen grandes presas que se pueden considerar más inseguras que las presas del Cabildo, como p.e., las grandes presas escalonadas de Los Pérez y Lugarejos, Las Garzas, La Represa del Pinto, La Marquesa, Tamaraceite, La Umbría, Caidero de la Niña, etc. Algunas de estas presas tienen una mayor antigüedad y capacidad de embalse que las presas de la Corporación Insular

y, en algunos casos, con una mayor población aguas abajo de los muros. Hay que decirlo con todo rigor: no se puede dejar la gestión de la seguridad de las presas al exclusivo juicio de un sólo funcionario, por muy 'experto' que sea, cuando se han estado décadas sin ejercer la vigilancia de presas y se ha llegado a garantizar la seguridad de las presas porque no había pasado nada durante años. Y por último, no parece compatible ni adecuado ser al mismo tiempo gestor de presas públicas y órgano competente en materia de seguridad de todas las grandes presas de una isla, especialmente cuando han originado un desequilibrio al clasificar primero unas presas frente a otras, sin contar para nada con la sociedad.



Fig. 18. Presa de Chira en Gran Canaria (JG)

Respecto al reconocimiento cultural de las grandes presas, debemos indicar que si en las islas Canarias el clima es el asombro de propios y extraños, sin que haya otro lugar del mundo que la supere en excelencias, también lo es todo lo ingeniado por el hombre durante los últimos 500 años para captar, almacenar y trasvasar el agua para regar los 'campos fabricados' [bancales] en sus barrancos y costas: exponente del esfuerzo desplegado por el agricultor. El isleño ha sabido siempre amoldarse a las circunstancias, favorables o adversas, de cada momento, siendo las grandes presas las obras hidráulicas más complejas construidas en las islas.

Escribió un 'maestro de ideas' que «la naturaleza es una función de la cultura correspondiente», luego quinientos años de trabajo y sangre determinaron la existencia de varias culturas de agricultores que tuvieron su

manera de observar la Naturaleza, de conocerla y utilizarla. Las primeras culturas derivaron las aguas continuas a través de surcos y construyeron minas de agua bajo los acarreos y conglomerados de los barrancos, excavaron pozos y pusieron azudes en los cauces a las aguas discontinuas para derivarlas a pequeños estanques. Posteriormente, desde finales del siglo XIX hasta 1980, la cultura de la 'batalla del agua' ejecutó miles de obras hidráulicas principales que cambiaron por completo el paisaje de muchas zonas de las islas: estanques, pozos, presas, minas de agua, galerías, túneles de trasvase, canales, tuberías. También nos dejaron obras auxiliares, caminos de servicio, puentes, canteras, escombreras, edificaciones, ruinas, maquinaria abandonada, cantoneras, etc. Fue una cultura del agua irrepetible.

Respecto a las grandes presas, dice el antiguo *Catálogo Oficial de las presas de embalse con altura superior a los 15 metros del Ministerio de Obras Públicas* (1962), que «España es uno de los países con más antigua tradición en obras de presas», y que «de las 283 grandes presas en explotación a finales de 1961, 48 han sido catalogadas en las islas Canarias, cifra esta más que suficiente para calibrar la importancia de las obras realizadas en esa parte de la España Insular». Ahora bien, al observar la relación de las 48 presas construidas en Canarias entre los años 1902 y 1962, a la que habría que sumarle, entre otras, las presas del Hormiguero y la del Toscón (Granadillar) por su rotura en 1934, recordamos enseguida las palabras que Joaquín Amigó nos dejó en 1953: «viajero, cuando vayas por nuestras carreteras y contemples esos campos cultivados, piensa por un momento en lo que ha costado obtener el agua para regarlos y que eso del aplatanamiento de los canarios es una leyenda inventada por quienes no nos conocen, aunque nosotros, modestamente, la explotamos».

Si como dijo el ingeniero Federico Macau Vilar en su magnífico libro *El Problema Hidráulico Canario* (1960), «el agua es en cualquier parte de la tierra uno de los factores esencialmente vitales; su abundancia o su escasez definen formas determinadas de vivir y de carácter, no sólo hace variar el paisaje, sino también el nivel de vida, el tipo y desarrollo de los métodos de la Agricultura y de la Industria, e incluso la manera de ser y de pensar de los hombres»; podemos entonces pensar y decir que en la diversidad del paisaje canario las grandes presas de mampostería ciclópea no solo son las grandes obras hidráulicas de Canarias, sino que también son los grandes elementos patrimoniales históricos y culturales de aquella antigua forma de hacer agricultura. Como dijo el presista Alfonso Cañas Barrera en 1961, «elevada casi al rango de la jardinería». Todas las grandes presas antiguas de Canarias son obras hidráulicas de gran interés cultural.

Por último, las presas de construcción antigua, ejecutadas hasta que tuvo lugar la visita a las islas en enero de 1964 de los ingenieros del Servicio de Vigilancia de Presas del Ministerio de Obras Públicas,

presentan las siguientes características generales: ausencia de galerías de visita, drenaje de la fábrica, desagüe de fondo y a veces de aliviadero de superficie. Sus mampuestos, en gran parte de los casos, tienen una densidad muy reducida. Varias presas antiguas tienen una gran galería de limpia que podría actuar como desagüe de fondo en caso de emergencia (p.e., presas de la Marquesa, los Pérez o Cueva Grande en Gran Canaria), pero algunos titulares condenaron estas galerías, mientras que otros ni siquiera las llegaron a construir (p.e., Presa de Chira). Existe mucha presas antiguas inacabadas [p.e., las Peñitas en Fuerteventura (Fig. 19)], numerosos recrecimientos sobre presas primitivas (p.e., los Hornos, Mulato, Vaquero y la Umbría en Gran Canaria) y un dominio de la planta curva frente a la recta. La década de 1960 fue la de transición en lo que respecta a los materiales y a las tipologías: de presas de mampostería con mortero de cal o mixto pasó a construirse presas de hormigón mamposteado (algunas con grandes piedras) o de hormigón (p.e., la bóveda de Soria).



Fig. 19. Presa de las Peñitas en Fuerteventura (JG)

En cuanto a la tipología de las presas antiguas, hubo un dominio absoluto de las presas de gravedad. Hay que resaltar que la magna bóveda de Soria se construyó durante la década donde coexistió la fuerte tradición de la mampostería ciclópea, el hormigón mamposteado y el hormigón. Hubo varios diseños de presas de escollera en la primera mitad del siglo

XX, pero solo se ejecutó la extraordinaria presa de escollera de Tamadaba entre 1943 y 1954 (Gran Canaria). Algunas presas antiguas son muros de fábrica pétreas de gran expresión estética, cuya contemplación produce agrado a propios y extraños. Y muchas presas antiguas son obras hidráulicas de gran interés cultural por su diseño, construcción y formas estructurales e hidráulicas. Por consiguiente, muchas de las grandes presas construidas en Canarias tienen notorios valores históricos y culturales para obtener la máxima figura de protección del patrimonio español (Bien de Interés Cultural), al ser símbolos de una realidad incuestionable: son obras hidráulicas extensas, colosales y grandes. Grandes estructuras que generan asombro, fascinación y admiración. La mayor parte de ellas construidas por los agricultores.

El número de presas modernas que fueron construidas y terminadas bajo la tutela del Servicio de Vigilancia también es numeroso e interesante. Las presas de escollera se construyeron en Gran Canaria en los años 70. Nunca se olvidará la puesta en carga de forma súbita en enero de 1979 de las presas de Tirajana y Siberio. En La Gomera se construyeron las presas de Amalahuigue y Mulagua, mientras que en Tenerife no hubo un proyecto óptimo de unidad presa y terreno con la Presa de los Campitos. Me explico: existen en Gran Canaria numerosos ejemplos de presas antiguas con revestimientos de fábrica en sus vasos. Si el cauce era permeable se impermeabilizaba, siendo la Presa de Casablanca el mejor ejemplo que existe del trabajo artístico de impermeabilización de un cauce.

Dice el arquitecto Eduard Callís Freixas en su magnífica tesis *Arquitectura de los pantanos en España* (2015) que «las presas son la máxima expresión del poder, un libro abierto a la evolución técnica y el espejo de la relación del hombre con la naturaleza». Por consiguiente, la construcción de 120 grandes presas en apenas cien años justifica que en el siglo XXI no sólo debamos reconocer los notorios valores históricos que tienen las grandes presas canarias y conservar debidamente en los Archivos su extenso patrimonio documental, sino efectuar una importante revisión del estado en que se encuentran, especialmente las viejas presas de mampostería con población, bienes y medioambiente aguas abajo. En el pasado los ingenieros de Vigilancia de Presas dijeron sobre Canarias que «la administración debía de sentirse preocupada», pero en la actualidad los *ayudantes funcionarios* de las administraciones no se sienten preocupados. Hasta ahora sus intervenciones han sido políticas y económicas, cuando tendrían que ser con un enfoque técnico y de cálculo. Además, la clasificación de las presas o la elaboración de los planes de emergencia, sin la participación de la población y otras administraciones, es un gran error.

Respecto a declarar a las grandes presas como monumentos de ingeniería (Bienes de Interés Cultural), es necesario evitar informes desfavorables de un arqueólogo funcionario, capaz de escribir que «no está

comprobada la construcción de la cimentación de la Presa de Cuevas Blancas» (cuando la cimentación ejecutada está en el perfil tipo dibujado por la constructora en 1939, en los datos del sondeo mecánico llevado a cabo por el Servicio Geológico de Obras Públicas en 1971 y en la puesta en carga de la presa en 1956); y de un ingeniero funcionario, capaz de escribir que La Vieja Presa de los Cocos «es una edificación normal, sin ningún tipo de relevancia, con un procedimiento constructivo muy común a otras presas existentes en la Comunidad Canaria y construidas en la misma época». La Vieja es la segunda presa más antigua de Canarias y no es una ‘edificación normal’. He aquí, pues, que todas las grandes presas Canarias deben ser estudiadas en función de su vinculación a la cerrada, a la técnica y a los medios, de ahí las notables diferencias que existen, por ejemplo, entre las tres grandes presas más antiguas de Canarias: La Represa del Pinto, La Vieja de los Cocos y Tabares. El conocimiento es el primer paso para construir nuestro patrimonio. Ensayo personal.

Bibliografía

- ALONSO, M. & G. ZARAGOZA (2001). Normativa sobre seguridad de presas. *Revista de Obras Públicas* 3407: 75-83.
- ALONSO FRANCO, M. (2003). El cimiento y la seguridad de la presa. Jornada técnica sobre tratamiento del terreno en la cimentación de presas. *CNEGP y ATESS*. Madrid. 39-53.
- BENÍTEZ PADILLA, S. (1959). *Gran Canaria y sus obras hidráulicas*. Cabildo Insular de Gran Canaria. Las Palmas.
- BUENO HERNÁNDEZ, F. (2007). Las presas históricas españolas. Ingeniería y patrimonio. En M. Arenillas, C. Segura, F. Bueno, S. Huerta (Eds.), *Actas del Quinto Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Burgos, 7-9 junio 2007*. Instituto Juan de Herrera, SEHC, CEHOPU. Madrid.
- CALLÍS FREIXAS, E. (2015). *Arquitectura de los pantanos en España*. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Barcelona.
- COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS - CNEGP (2010). *La vigilancia: elemento básico de la gestión de seguridad de presas*. Madrid.
- DE ANDRÉS, M. & J. PENAS (2003). Presas. Seguridad y percepción del riesgo. *Revista Ingeniería y Territorio* 62: 22-27.
- DE CEA, J.C. & F.J. SÁNCHEZ (2010). Gestión de la seguridad de presas. *Revista de Obras Públicas* 3509: 73-82.
- DÍEZ-CASCÓN SAGRADO, J. & F. BUENO HERNÁNDEZ (2001). *Ingeniería de Presas: presas de fábrica*. Universidad de Cantabria. Santander.
- DÍEZ-CASCÓN SAGRADO, J. & F. BUENO HERNÁNDEZ (2003). *Las presas y embalses en España. Historia de una necesidad. I. Hasta 1900*. Ministerio de Medio Ambiente.
- GIRÓN, F. & F. VÁZQUEZ (2010). Mejora de presas existentes. *Revista de Obras Públicas* 3509: 65-72.

- GONZÁLEZ GONZÁLVEZ, J. (2005). Tengamos agua y lo tendremos todo. Las grandes presas de Gran Canaria. En F. Bueno Hernández & D. Saldaña Arce (Eds.), *Actas II Congreso Nacional de Historia de las Presas* (Burgos 20, 21 y 22 de octubre de 2005), pp. 449-465.
- GONZÁLEZ GONZÁLVEZ, J. (2007). Las presas del Cortijo de Samsó en Tamadaba (Gran Canaria). *V Congreso Nacional de Historia de la Construcción*. Instituto Juan de Herrera. Burgos.
- GONZÁLEZ GONZÁLVEZ, J. (2008). *Las grandes presas de Gran Canaria. Toponimia, propiedad, tipología y construcción*. La Cultura del Agua en Gran Canaria. Gobierno de Canarias. Tenerife.
- GONZÁLEZ GONZÁLVEZ, J. & D. SALDAÑA ARCE (2009). Construcción, recrecido e incidente de la Presa de Martinón (San Lorenzo) Gran Canaria 1902 – 1988. *IV Congreso Internacional de Patrimonio e Historia de la Ingeniería*. LPGC.
- GONZÁLEZ GONZÁLVEZ, J. (2009). *Construcción, recrecido e incidente de la Presa de Martinón (San Lorenzo) Gran Canaria 1902 – 1988*. LPGC.
- GONZÁLEZ GONZÁLVEZ, J. (2009). *La Presa de las Cuevas de las Niñas en Majada Alta – Gran Canaria (Construcción, estabilidad, obra y terreno) 1930 – 2009*. LPGC.
- GONZÁLEZ GONZÁLVEZ, J. (2009). *Siete presas, nueve estanques y una tubería. Cortijo de Samsó – TAMADABA, Gran Canaria, 1907 – 2009*. LPGC.
- GONZÁLEZ GONZÁLVEZ, J. (2010). *Presa de Soria. Una historia de proyectos, informes y notas informativas. Gran Canaria, 1935 – 1972*. LPGC.
- GONZÁLEZ GONZÁLVEZ, J. (2011). *La Presa de Cuevas Blancas en la cumbre de Gran Canaria: proyectos, cimientos, sondeos y cemento (1905 – 1971)*. El conocimiento de los recursos hídricos en Canarias cuatro décadas después del proyecto SPA-15. LPGC.
- GONZÁLEZ GONZÁLVEZ, J. (2012) Construction of large dams in the Canary Islands. *XXIV Congreso Internacional de la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD-CIGB)* – Kyoto, Japón.
- GONZÁLEZ GONZÁLVEZ, J. (2012). *Valoración del patrimonio hidráulico en Gran Canaria: presas, estanques, pozos, galerías, canales y tuberías*. LPGC.
- GONZÁLEZ GONZÁLVEZ, J. & J.C. SANTAMARTA CEREZAL (2012). Singularidades y evolución técnica de la ingeniería de presas en las Islas Canarias. *Revista de Obras Públicas* 3530: 33-50.
- GONZÁLEZ GONZÁLVEZ, J. (2013). *Un ejercicio de investigación: las grandes presas de la Heredad de Aguas de Arucas y Firgas*. LPGC.
- GONZÁLEZ GONZÁLVEZ, J. (2014). *Inseguridad de presas en Gran Canaria (Islas Canarias)*. LPGC.
- GONZÁLEZ GONZÁLVEZ, J. (2014). *Simón Benítez Padilla: maestro de presas*. LPGC.
- GONZÁLEZ GONZÁLVEZ, J. (2015). Registro de las grandes presas canarias en explotación (Islas Canarias). *X Jornadas Españolas de Presas*. CNEGP. Sevilla.
- GONZÁLEZ GONZÁLVEZ, J. (2015). Registro de las grandes presas en explotación en la isla de La Gomera (Islas Canarias). *X Jornadas Españolas de Presas*. CNEGP. Sevilla.

- GONZÁLEZ GONZÁLVEZ, J. (2017). *Presa de Chira: expresión personal*. LPGC.
- GONZÁLEZ GONZÁLVEZ, J. & E. ECHEVARRÍA GARCÍA (2018). Presa de Siberio: in memoriam Emilio Benítez Pascual Maestro de presas. *IX Jornadas Españolas de Presas*. CNEGP. León.
- MACAU VILAR, F. (1957). Estudio hidrológico de Gran Canaria. *Anuario de Estudios Atlánticos* 3: 8-46.
- MACAU VILAR, F. (1960). *El Problema Hidráulico Canario*. El Museo Canario. Las Palmas de Gran Canaria.
- MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS. DIRECCIÓN GENERAL DE OBRAS HIDRÁULICAS (1972). *Estudio científico de los recursos de agua de las Islas Canarias (Informe General 2)*, Fondo Especial de Naciones Unidas, UNESCO, Madrid.
- MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS. DIRECCIÓN GENERAL DE OBRAS HIDRÁULICAS (1975). *Estudio científico de los recursos de agua en las Islas Canarias (SPA/69/515)*, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, UNESCO, Madrid.
- SALDAÑA ARCE, D. (2011). *Presas de mampostería en España*. Tesis Doctoral. Universidad de Santander.
- SÁENZ RIDRUEJO, F. (2010). Manuel Alonso Franco: maestro de presas. *Revista de Obras Públicas* 3509: 99-102. (Ejemplar dedicado a Brasilia 2009: XXIII Congreso Internacional de Grandes Presas).

4. Estudios ambientales en relación con los vertidos de tierra al mar en Canarias

**Óscar Monterroso-Hoyos,
Myriam Rodríguez, Eva Ramos, Óscar Pérez, Omar Álvarez,
Lorenzo Cruces y Amaya Miguel**

*Centro de Investigaciones Medioambientales del Atlántico S.L.
(CIMA). Avenida de los Majuelos 115,
38107 Santa Cruz de Tenerife, Islas Canarias, España.
email:oscar@cimacanarias.com.*

Las aguas residuales resultado de su utilización tanto a nivel doméstico como industrial siempre han constituido un problema que de una manera bastante ingenua se ha querido resolver simplemente ocultándolas a la vista. Verterlas al mar ha sido la opción a la que han recurrido las poblaciones litorales, lo que ha implicado una profunda degradación de las zonas costeras próximas a las áreas urbanas. Conscientes del grave problema, en la actualidad nos hemos dotado de una estricta legislación emanada de las directrices de la Unión Europea (UE) que afecta a todos los estados miembros con respecto tanto al tratamiento al que se deben someter las aguas residuales antes de ser vertidas, como a los mecanismos a desarrollar para mantener un buen estado ambiental de las aguas costeras. Desafortunadamente, Canarias se encuentra bastante atrasada en el cumplimiento de los plazos dados por la UE para resolver los problemas ligados al saneamiento y a los vertidos al mar.

La legislación obliga a la realización de estudios ambientales tanto durante el planeamiento de un vertido autorizado, como después de puesto en funcionamiento, para valorar su correcta gestión. En CIMA hemos adquirido una amplia experiencia en la realización de estos estudios y contamos con modernos equipos que nos permiten abordar todos los aspectos requeridos por la legislación. Estos estudios ambientales los llevan a cabo biólogos marinos especializados en gestión ambiental y siguen un detallado protocolo que incluye la recopilación de la información existente sobre la zona de posible afección por el vertido, el estudio hidrodinámico de la zona, la cartografía de las comunidades y los hábitats del litoral, el estudio de la calidad del agua y la del sedimento en los fondos no rocosos. Con toda esta información es posible analizar y valorar los potenciales impactos en el medioambiente de un vertido de tierra al mar durante la fase de ejecución del proyecto y durante su fase de explotación, con el fin de que se puedan tomar las decisiones convenientes.

Introducción

Las intervenciones humanas en sentido amplio han supuesto, a lo largo de la historia, una transformación paulatina del medioambiente, si bien nunca con tanto vigor como en los últimos decenios. Nos encontramos ante un modelo de desarrollo dominante más que cuestionable y que está generando importantes transformaciones en todos los ecosistemas del planeta. Tales de Mileto (624 a.C.), fue el primero que afirmó que la tierra era circular y que el agua es el principio de la vida universal y el elemento conductor de la naturaleza, pues bien, este elemento conductor que alimenta al conjunto de la biosfera, desde mucho antes que el pensamiento de este hombre sabio sugiriera su importancia, en la realidad actual, sufre grandes riesgos, presiones y deterioros.

Actualmente, aunque la opinión pública es bombardeada con los datos alarmantes de los riesgos del calentamiento global del planeta, del efecto invernadero, de los efectos nocivos para la salud humana de las sustancias contaminantes, etc., parece que la ciudadanía, en general, no ha adquirido una conciencia clara de la gravedad y la proximidad del problema, o cree que no le concierne de forma inmediata, por lo que delega su responsabilidad en parte en los políticos, y en parte, en los científicos y técnicos. En muchas ocasiones también se banaliza la lucha por la conservación del medioambiente por su oposición a fuertes intereses económicos y la dificultad de encaje en una sociedad de alto consumo. Así, es importante que la sociedad tenga una visión lo más real posible de los

problemas ambientales de su entorno y que se produzca un pensamiento crítico global que sea capaz de traspasarse a la política, y de esta manera se prioricen las acciones encaminadas a mejorar esta situación. Uno de los problemas ambientales que tenemos en nuestro entorno inmediato es la existencia de una degradación ambiental acumulativa, que se produce en nuestros mares debido a los vertidos desde tierra al mar afectando a nuestro litoral y ecosistemas marinos costeros.

Las presiones e impactos en las aguas costeras de Canarias, en rasgos generales son similares a las de otras zonas litorales del mundo. Estas fuerzas contaminantes que pueden originar presiones sobre las aguas costeras en Canarias son principalmente la población, la industria, el desarrollo portuario y diversos usos costeros, como es el caso de la acuicultura marina (Fig. 1). Estas posibles presiones se englobarían, dentro de las categorías de presiones por fuente de contaminación puntual y por fuente de contaminación difusa.



Fig. 1. Ejemplos de presiones sobre las aguas costeras de Canarias. A. Poblaciones costeras. B. Industrias. C. Instalaciones portuarias. D. Acuicultura.

Las principales presiones generadas por contaminación de fuente puntual se deben a los vertidos directos desde tierra al mar. Estos pueden ser de muy diversas procedencias, encontrándose vertidos de naturaleza

urbana, industrial, salmueras procedentes de las desaladoras e incluso existen casos en los que estos vertidos se producen de forma conjunta.

La mayor problemática de los vertidos de aguas residuales urbanas se asocia a los altos niveles de materia orgánica, así como de compuestos de nitrógeno (nitratos y nitritos) y de fósforo (fosfatos), además de una gran variedad de microorganismos derivados de las actividades del hombre (principalmente bacterias coliformes y estreptococos).

Los vertidos de aguas residuales industriales pueden ser de muy diferente procedencia y por lo tanto la naturaleza del contaminante al igual que su comportamiento en el medio receptor, también puede ser muy variada. Por lo general, la contaminación que presenta este tipo de vertidos, es una contaminación de naturaleza química de diferentes clases, y también de naturaleza térmica proveniente de los sistemas de refrigeración.

La salmuera es un tipo diferenciado de vertido que tiene su procedencia en las estaciones desaladoras. Durante su funcionamiento se produce un importante volumen de agua de rechazo, un producto secundario compuesto por una salmuera de elevada salinidad (43-90 usp) y por otros aditivos que se emplean en el proceso de desalación.

Los vertidos generados por las instalaciones de acuicultura marina, casi en su totalidad ubicadas en mar abierto y dedicadas al engorde de peces (dorada y lubina), también son, aunque en mucha menor medida, una fuente de contaminación puntual. Los sistemas de cultivo intensivo en jaulas liberan residuos orgánicos directamente al medio, tanto en forma sólida (pienso no consumido y heces) como disuelta (excreción de amonio), impactando tanto la columna de agua como el sedimento del fondo marino. Estos residuos, constituidos principalmente por C, N y P, pueden originar diferentes impactos dependiendo de la cantidad, de las condiciones hidrográficas de la zona y del tipo de ecosistema receptor (Fig. 2).

Las principales presiones por contaminación de fuente difusa son los entornos portuarios, siendo las sustancias vertidas en estas instalaciones muy diversas, entre las que se pueden destacar hidrocarburos, aceites, metales pesados, además de fugas de sustancias peligrosas y de organismos transportados accidentalmente por barcos y plataformas en aguas de lastre o en el *fouling* del casco, que pueden ser responsables, como ya se ha constatado en numerosos casos, de la introducción de especies alóctonas con potencial invasor (Fig. 3).

De manera que es posible asegurar que de todas las presiones que sufre el litoral de Canarias, son los vertidos de tierra al mar la principal amenaza sobre la calidad de las aguas costeras.

Estas presiones sobre el medio marino son tan reales, como es la consideración del medio marino como un lugar de ocultación de una gran parte de nuestros residuos.

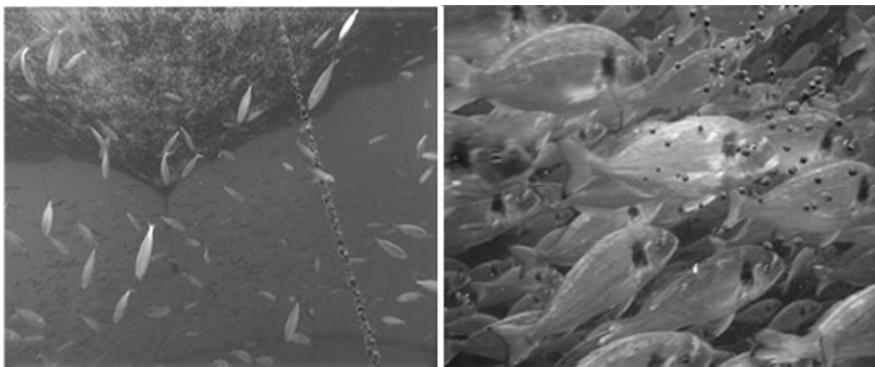


Fig. 2. Ejemplos de vertidos de acuicultura. Los cultivos intensivos en jaulas liberan residuos orgánicos directamente al medio, tanto en forma sólida como disuelta.



Fig. 3. Ejemplos de actividad portuaria en Canarias relacionada con plataformas y buques perforadores.

Queremos, y debemos, tener nuestras aguas costeras en buen estado ambiental y una herramienta fundamental para conseguirlo debe ser un buen conocimiento del medio marino que constituya la base para poder adoptar las medidas oportunas para minimizar y evitar los impactos que generamos en nuestra actividad.

Situación de los vertidos en Canarias

En base a los datos publicados en el última actualización del censo de vertidos de noviembre de 2017 por la Dirección General de Protección de la Naturaleza del Gobierno de Canarias (Fig. 4) se desprende que existen

censados actualmente en Canarias un total de 394 puntos de vertido de los cuales 49 son emisarios submarinos, 306 conducciones de desagüe y 30 instalaciones en el dominio público marítimo terrestre (DPMT).

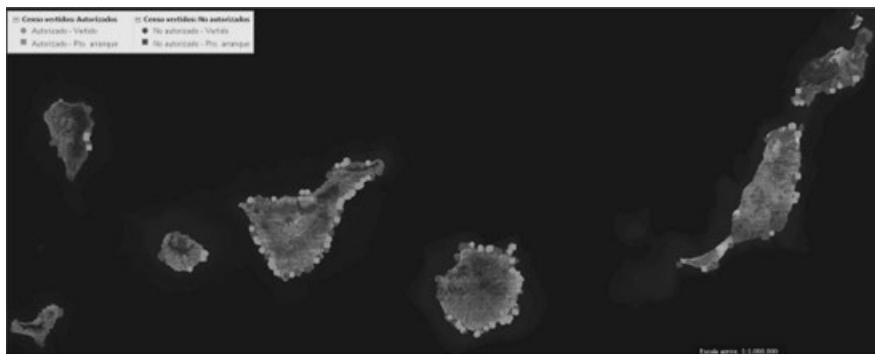


Fig. 4. Distribución de vertidos tierra-mar en Canarias [Fuente: Actualización Censo de vertidos de Canarias 2017 (CivilPort Ingenieros)].

Del total de vertidos que se realizan en el litoral de Canarias a fecha del mencionado informe, solo el 29% cuentan con la preceptiva autorización, mientras que el 71% restante no están autorizados. De estos vertidos cabe destacar que el 57% corresponden a aguas residuales urbanas (224 vertidos), 15% de agua salada de piscinas (59 vertidos) y 12% de salmuera de plantas desaladoras (52 vertidos) (Fig. 5).

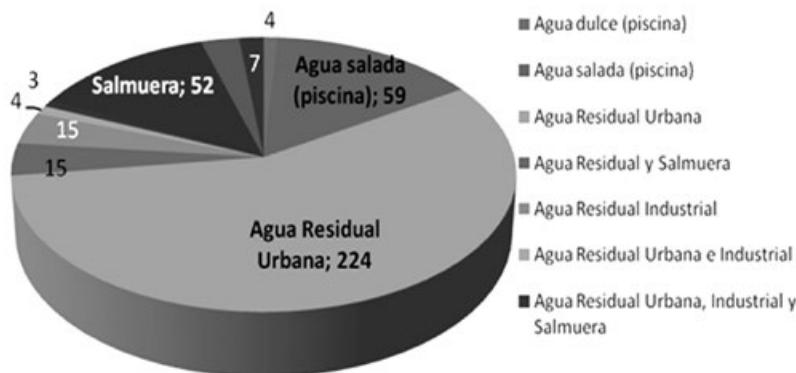


Fig. 5. Naturaleza de los vertidos tierra-mar en Canarias [Fuente: modificado de Actualización del Censo de vertidos de Canarias 2017 (CivilPort Ingenieros)].

Centrándonos en la isla de Tenerife, en este censo se señala la existencia de 172 vertidos, de los cuales el 66% corresponden a aquellos que carecen de autorización (113 vertidos) y solo el 34% están autorizados (Fig. 6).

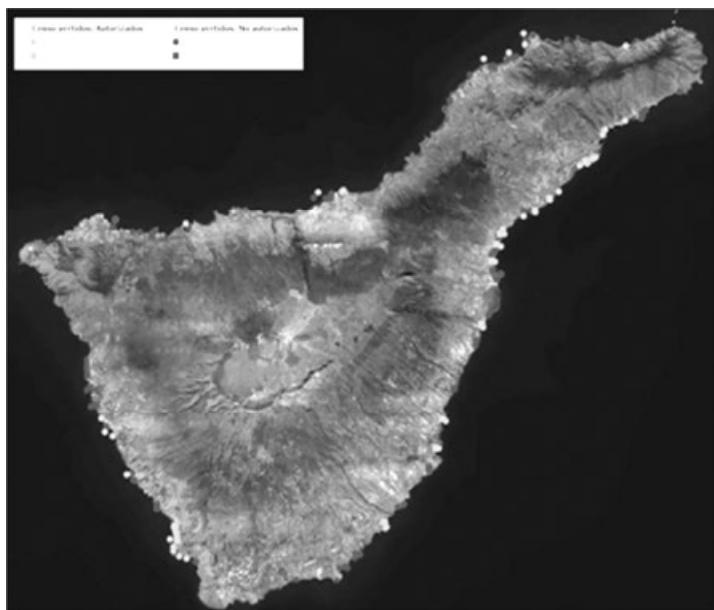


Fig. 6. Distribución de vertidos tierra-mar en Tenerife [Fuente: Actualización Censo de vertidos de Canarias 2017 (CivilPort Ingenieros)].

La mayoría de los vertidos no autorizados no recibe ningún tratamiento previo antes de llegar al mar, y por lo tanto, incumplen los requerimientos de la actual legislación. Además, es común que un mismo emisario desaloje de forma conjunta tanto vertidos urbanos como industriales.

La mayor parte de los núcleos más poblados de Canarias tienen cierto control sobre sus vertidos al mar, al igual que ocurre con las industrias, que son objeto en principio de una mayor vigilancia. Los tratamientos secundarios sólo se llevan a cabo en las grandes depuradoras de algunos de los grandes núcleos urbanos, evitando que agentes tóxicos o contaminantes lleguen al mar. Sin embargo, el problema se agrava con los núcleos pequeños y dispersos, ya que son muy pocos los que someten sus aguas residuales a un tratamiento antes de ser vertidas al mar.

Otro punto problemático se encuentra en los vertidos que provienen de polígonos industriales, puesto que la gestión de los mismos corresponde a los ayuntamientos que, muchas veces, carecen de los medios suficientes

para llevar a cabo ese control. Además, en los polígonos se suman los vertidos procedentes de todas las industrias y por lo que resulta complejo determinar la empresa que más contamina y el contaminante responsable.

En los diferentes censos y estudios realizados sobre vertidos tierra a mar, se ha observado con cierta frecuencia, que la información disponible difiere en función de la fuente consultada. Las principales causas de esta dificultad se describen a continuación.

- La mayor parte de los ayuntamientos no tienen un conocimiento adecuado de la infraestructura y características de sus redes de saneamiento.
- Existe una proliferación de pequeñas urbanizaciones privadas sin recepcionar por parte de los ayuntamientos, así como de pequeños núcleos urbanos derivados de procesos de autoconstrucción, sobre los que es difícil recabar información de cualquier tipo.
- Las empresas privadas implicadas en la gestión de aguas residuales o vertidos de cualquier naturaleza generalmente se muestran reacias a facilitar la información requerida.
- Frecuentemente no existen datos sobre las características básicas de los efluentes, como por ejemplo los caudales, lo que supone que algunos de estos datos deban ser estimados.
- La compleja orografía insular (por ejemplo, la costa norte de Tenerife), junto con la gran dispersión de las edificaciones allí existentes, dificulta una exhaustiva identificación de todos los focos potenciales de vertidos de origen doméstico/urbano, si bien estos son normalmente de escaso aforo.
- No existe información técnica adecuada sobre las infraestructuras marítimas, especialmente en cuanto a localización de conducciones se refiere.

De manera que para minimizar los efectos contaminantes de un vertido, es absolutamente necesario la realización de diversos estudios ambientales con el propósito de garantizar, en la medida de lo posible, un mínimo impacto ambiental, garantizando de este modo la estabilidad e integridad de los ecosistemas.

Estudios Ambientales

Los estudios ambientales relacionados con vertidos de tierra al mar deben realizarse tanto desde la fase de diseño de un proyecto constructivo (por ejemplo, el diseño o proyecto de instalación de una conducción de vertido), como durante el proceso de gestión de un vertido ya en funcionamiento. Estos estudios ambientales se deben enfocar en primera

instanciada a la caracterización del medio receptor del vertido, en este caso el medio marino. Esta caracterización debe cumplir con los requerimientos de la legislación de aplicación (Orden de 13 de julio de 1993 por la que se aprueba la Instrucción para el proyecto de conducciones de vertidos desde tierra al mar) que indica, en su apartado 5.3.4, la obligatoriedad de ejecutar perfiles de temperatura, salinidad, corrientes, biocenosis y contaminación de fondo, batimetría, etc. Estos datos son necesarios para la realización del estudio de la afección del proyecto. Este estudio de afección debe valorar las posibles consecuencias de un vertido que pueden derivar en:

- Un impacto ambiental.
- Una incompatibilidad con los objetivos de la Estrategia Marina Canaria.
- Un incumplimiento de las Normas de Calidad Ambiental (NCA) que son los valores de referencia.

Metodología de los estudios ambientales

En primer lugar, se realiza la caracterización del medio receptor del vertido a partir de la recopilación de la información existente de la zona. Se trata de información relevante para el estudio de afección del vertido, como por ejemplo, la existencia de espacios protegidos o de interés en la zona (Fig. 7), el ecotipo de agua costera que se va a ver afectado (Fig. 8), la

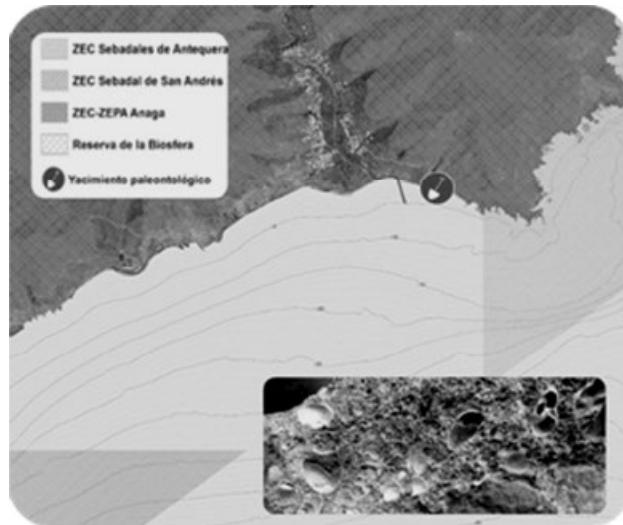


Fig. 7. Ejemplos de datos recopilados para estudios de afección de vertidos: espacios protegidos.



Fig. 8. Ejemplos de datos recopilados para estudios de afección de vertidos: ecotipos de aguas costeras.

existencia de otras fuentes de contaminación puntuales o difusas, la presencia de zonas de aguas de baño y playas, la batimetría y los datos de pendiente que permitan la generación de modelos digitales del terreno en dos y tres dimensiones (Figs 9, 10) que luego serán necesarios para realizar los pertinentes cálculos de dispersión del vertido, etc.

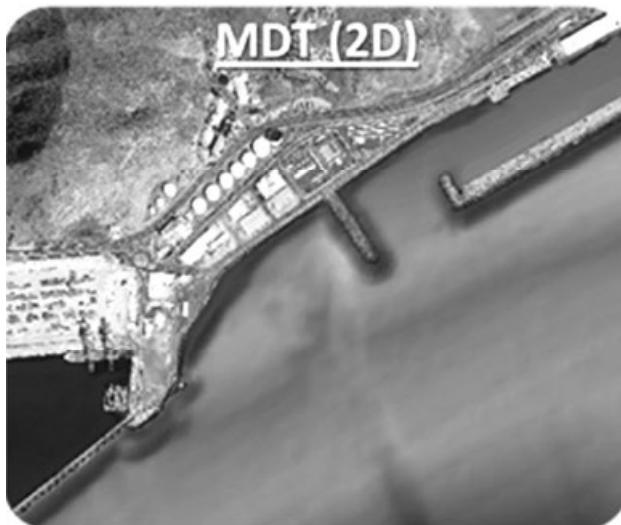


Fig. 9. Ejemplos de datos recopilados para estudios de afección de vertidos: modelo digital del terreno en dos dimensiones.

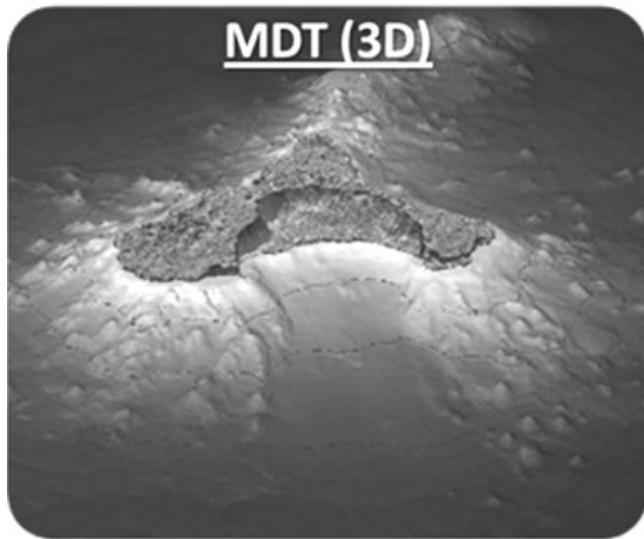


Fig. 10. Ejemplos de datos recopilados para estudios de afección de vertidos: modelo digital del terreno en tres dimensiones.

Una vez recopilada la información existente para caracterizar el medio receptor y conocidos los datos del diseño del proyecto, incluido el emplazamiento y caudal previsto de la conducción, se tiene que acometer una campaña para realizar el estudio de modelización o hidrodinámico del vertido, para establecer cómo se comportará en el medio receptor y poder inicialmente responder a la cuestión, ¿a qué, o a quiénes puede afectar este vertido?

Estudio hidrodinámico

Para determinar el comportamiento del vertido en el medio se tienen que realizar mediciones para caracterizar las corrientes locales. Para ello se utilizan dos métodos: el método euleriano (perfilador de corrientes) y el método lagrangiano (boyas de deriva). Con el primero se mide la velocidad y la dirección del flujo de la corriente en un punto con coordenadas geográficas y profundidades determinadas e inicialmente prefijadas (Fig. 11); mientras que el segundo consiste en el seguimiento de un objeto que viaja con la corriente (Fig. 12), permitiendo con este último calcular los coeficientes de dispersión.

Para la obtención de los datos de corrientes mediante métodos eulerianos, se debe utilizar un perfilador de corriente, preferiblemente

doppler. Son perfiladores porque nos dan perfiles de corrientes, es decir, situados en el fondo del mar mirando hacia arriba, miden la velocidad de la corriente a distintas profundidades, proporcionando un perfil de velocidades a lo largo de la columna de agua. Utilizan el sonido y el Efecto Doppler para estimar las velocidades. Es ubicado en el fondo marino y en posición vertical, con los transductores orientados hacia la superficie. La fijación al fondo se hace mediante una estructura y un fondeo específico, que asegurarán la estabilidad del aparato y su resistencia ante las inclemencias del mar. Antes de su instalación, en el laboratorio, el perfilador se configura para que tome los datos requeridos, con la temporalidad y en las capas de profundidad que se requieran para el estudio en cuestión.

Estos aparatos se deben mantener fondeados al menos medio ciclo de marea (unos 15 días) y una vez recuperados se realizan los cálculos de los estadísticos básicos de la velocidad y dirección de las corrientes por capas.

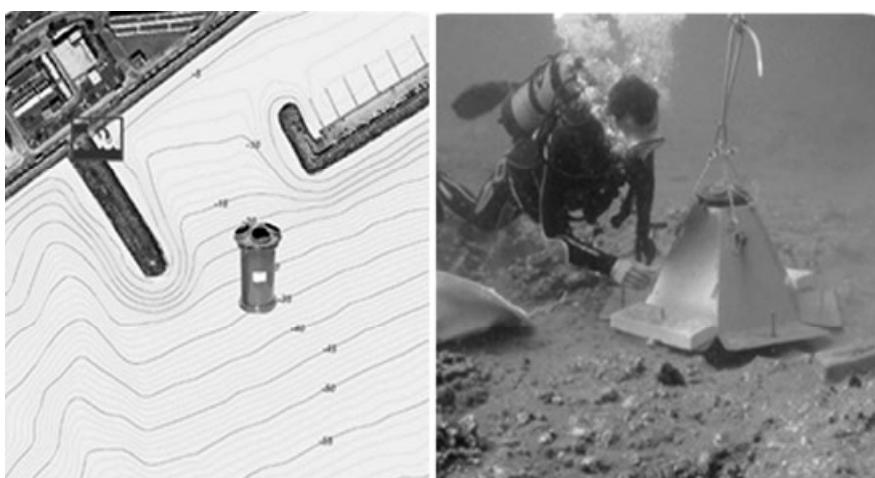


Fig. 11. El perfilador de corrientes mide la velocidad y la dirección del flujo de la corriente en un punto con coordenadas y profundidades determinadas.

La modelización hidrodinámica nos predice el comportamiento del vertido en el medio receptor, es decir, como va a ser su dilución y cuál va a ser su trayectoria. En resumen, nos indica hasta donde puede llegar su afección, teniendo siempre en cuenta que los procesos de mezcla deben calcularse tanto para lo que denominamos el campo cercano como el campo lejano.

El campo cercano es la zona principalmente afectada por la turbulencia inducida del efluente en el medio receptor, es decir, la zona próxima al vertido, donde la principal fuerza inicial es la del empuje del vertido. Este

campo cercano concluye cuando se interactúa con algún contorno. Cuando el vertido tiene flotabilidad positiva el campo cercano finaliza en la superficie del agua, mientras que si el vertido tiene flotabilidad negativa termina en el fondo marino (Fig. 13).

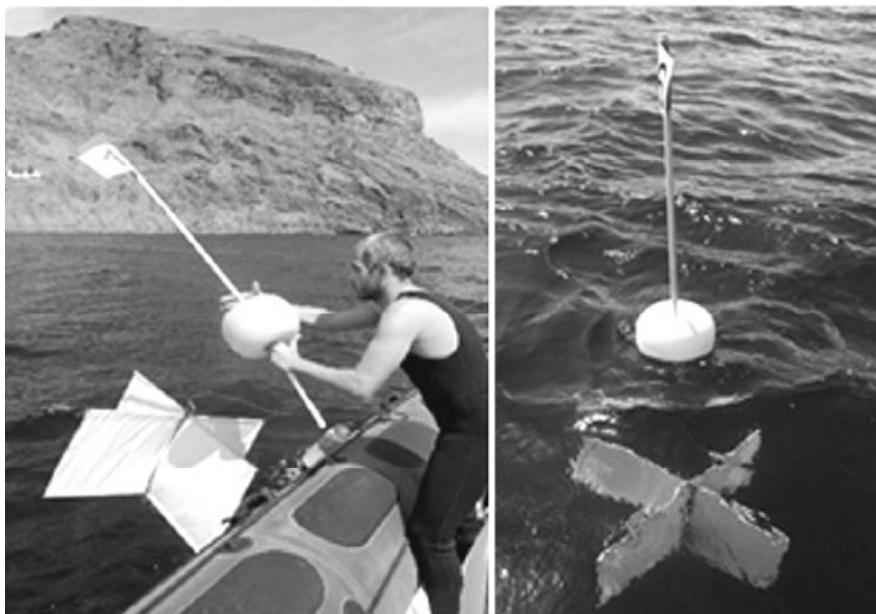


Fig. 12. El seguimiento de la boy a la deriva que viaja con la corriente permite determinar la velocidad y la dirección.

El tamaño de este campo cercano va a depender principalmente del mecanismo de descarga del vertido, es decir, del propio diseño de la conducción (número de difusores, orientación y geometría), del impulso de salida, la flotabilidad o densidad del vertido y de la profundidad desde la cual se produce.

En el campo cercano es donde se producen las mayores diluciones y por lo general abarca entre 100 a 300 metros y tiene una escala temporal de menos de 10 minutos.

El campo lejano, sin embargo, abarca desde la interacción con algún contorno (superficie o fondo), hasta aquella zona donde la concentración del efluente iguala a la del medio marino. Es la zona afectada por el empuje de la corriente (advección) y por la turbulencia ambiental. La escala espacial y temporal es mayor que en el campo cercano, normalmente se mide en kilómetros y horas, y su comportamiento depende mayoritariamente de las condiciones ambientales.

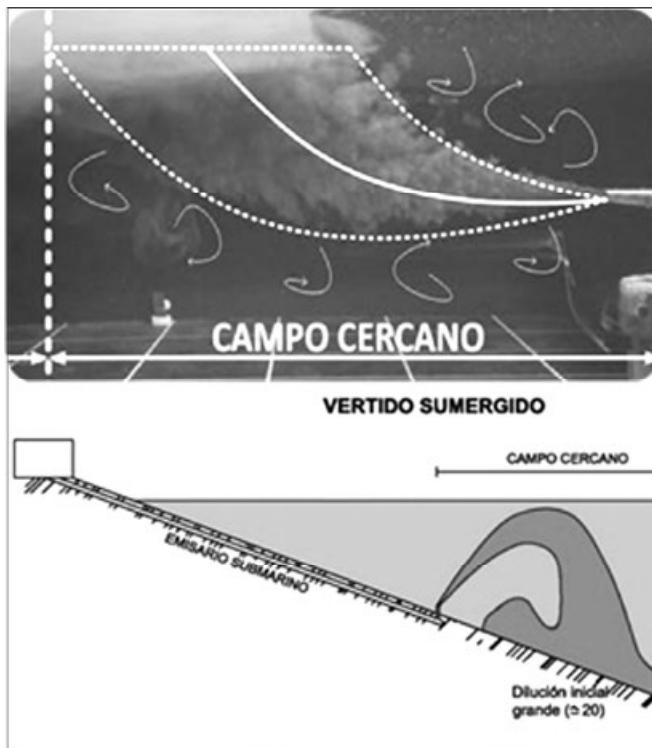


Fig. 13. Ejemplos de datos de campo cercano con vertidos de flotabilidad positiva o negativa.

Para medir el comportamiento del vertido en estos escenarios (campo cercano y campo lejano), hoy se dispone de diferentes software, que incluyen modelos numéricos que son ecuaciones y algoritmos, que en base al conocimiento actual, representan los procesos físicos que determinan la evolución espacial y temporal de las concentraciones de un vertido en el medio receptor. Estos modelos están parametrizados “a la carta”, es decir sus algoritmos y ecuaciones están optimizados para resolver los procesos físicos que gobiernan los procesos de mezcla, muchas veces en base a datos experimentales.

Los modelos a utilizar requieren estar “validados”, es decir, se debe demostrar empíricamente que los procesos que representan las ecuaciones y algoritmos que componen el modelo, se asemejan a los reales. Y nunca se debe olvidar que estos modelos son una herramienta predictiva, que en base a datos de entrada, a ecuaciones y algoritmos, se generan datos de salida que pronostican el comportamiento del vertido. De manera que es necesario asegurar, por un lado, que los datos de entrada son correctos, y además

confirmar con estudios de campo que las predicciones del modelo concuerdan con lo que ocurre en la realidad.

Los modelos numéricos utilizados pueden ser de tres tipos:

- Modelos de predicción de campo cercano.
- Modelos de predicción de campo lejano.
- Modelos de predicción de campo cercano + campo lejano.

La tendencia actual es la utilización de estos últimos, que son unos modelos integrados donde el campo cercano y el campo lejano se conectan por medio de un algoritmo de acople.

En estos estudios ambientales sobre vertidos es necesario realizar multitud de modelizaciones, ya que son muchos los escenarios que se deben barajar. Inicialmente se modeliza teniendo en cuenta las posibles zonas de afección (costa, playas, zonas de baño, espacios protegidos y especies protegidas). A continuación se considera la velocidad y las direcciones de la corriente para diversas situaciones. Así, los valores medios representarían una situación normal; mientras que las desviaciones de la media corresponderían a una situación desfavorable. Por último se modeliza en base a los tipos de contaminante:

- Contaminantes no conservativos: aquellos que se degradan con el tiempo y por tanto es necesario especificar el coeficiente de decaimiento o de crecimiento (por ejemplo: *Escherichia coli*, enterococos, N, P, etc.).
- Contaminantes conservativos: son los que no sufren degradación con el paso del tiempo, como por ejemplo los metales pesados y los compuestos organoclorados (DDTs, PCBs).
- Contaminantes térmicos: en este caso es necesario especificar el coeficiente de transferencia de calor por unidad de superficie.

Además de los tipos de contaminante, es necesario modelizar de acuerdo con las concentraciones de los mismos, considerando varias situaciones. Los valores medios del efluente después del tratamiento representarían una situación normal; mientras que una situación desfavorable se modeliza con los valores máximos del afluente, es decir, como si el vertido fuera directamente al mar sin ningún tratamiento.

Una vez realizada esta modelización, y conociendo ya como se comportará el vertido, debemos desarrollar un análisis comparativo con los valores de referencia, de acuerdo con las normativas de aplicación, con respecto a:

- Calidad de aguas de baño.
- Estado de las aguas superficiales.
- Normas de calidad ambiental.

- Planes hidrológicos.
- Estudios técnicos y científicos que valoran los umbrales de tolerancia de las especies o comunidades marinas a determinados contaminantes.

Paralelamente al modelo hidrodinámico es necesario realizar un cartografiado bionómico, que incluya las comunidades y hábitats bentónicos del ámbito marino que puedan resultar afectadas por el vertido. Puesto que la bionomía es la parte de la biología que trata de las relaciones de los seres vivos entre ellos y con su entorno, en una cartografía bionómica se representan las comunidades biológicas en el lugar físico que ocupan. La metodología utilizada para levantar estas cartografías se detalla a continuación de una manera resumida.

Cartografías de comunidades y hábitats del intermareal

Se debe llevar a cabo un recorrido por toda la zona del litoral próxima al vertido, para reconocer el conjunto de comunidades presentes en la zona sometida a la oscilación de las mareas (franja intermareal). Las diferentes comunidades presentes en la zona son identificadas, fotografiadas y georreferenciadas, para su cartografiado. Posteriormente, se deben seleccionar varios puntos para llevar a cabo la caracterización de las macroalgas mediante el Índice Calidad de Fondos Rocosos (CFR). Este es un método multimétrico diseñado para establecer la calidad ambiental de una localidad litoral a partir de sus comunidades algales del intermareal o submareal. El CFR fue desarrollado por el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (Juanes *et al.*, 2008) y responde a los requerimientos de la Directiva Marco del Agua (DMA) (Decisión Comisión, 2013), que establecen las bases para llevar a cabo el monitoreo y seguimiento de una serie de bioindicadores que nos permiten determinar el grado de calidad ambiental de las masas de agua que bañan las costas europeas. Una de las principales ventajas de este índice es que para su aplicación no es necesaria la determinación taxonómica detallada de todas las especies de algas presentes en una zona determinada, por lo que es de fácil utilización en todas las regiones costeras con un de esfuerzo de muestreo reducido.

Este índice ha sido intercalibrado con éxito en varias zonas europeas y ha sido validado por la Comisión Europea para su uso en la implementación de la DMA (Real Decreto, 2013). A nivel nacional fue inicialmente aceptado por el Gobierno de España para el seguimiento de macroalgas en las costas atlánticas y recientemente ha sido incluido como indicador de calidad de las aguas costeras de Canarias (Real Decreto, 2015), aunque de momento no cuenta con límites preestablecidos. A nivel insular, el Plan

Hidrológico de Tenerife (Decreto, 2015) lo incorpora como uno de los indicadores representativos de los elementos de calidad biológica necesarios para determinar el estado de las masas de agua superficiales costeras.

Cartografía de comunidades y hábitats del submareal

Las técnicas actuales de cartografiado submareal (la zona situada siempre por debajo del límite de bajamar) se basan en primer lugar en el uso del *sonar de barrido lateral*, que proporciona una imagen o sonograma con la información necesaria y precisa sobre la naturaleza y morfología de la superficie del fondo. Aporta, con una precisión submétrica, la distribución de las distintas comunidades y hábitats, así como la presencia de objetos, conducciones de vertido, etc. (Fig. 14).

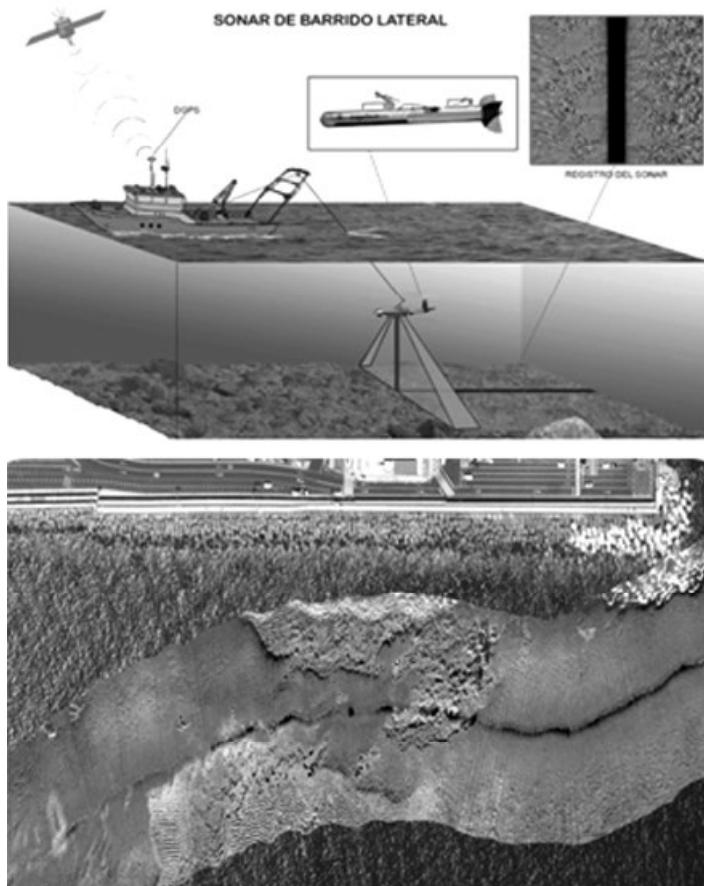


Fig. 14. Cartografiado con sonar de barrido lateral.

En base a los datos del sonar se diseña posteriormente una campaña de exploración mediante una cámara de vídeo georreferenciada que se remolca (al igual que el “pez” del sonar de barrido lateral) desde una embarcación a lo largo de una serie de transectos y puntos en la zona cercana al vertido. Se obtienen así imágenes de alta resolución que nos permiten visualizar e identificar de manera detallada las comunidades presentes en la zona de estudio (Fig. 15).

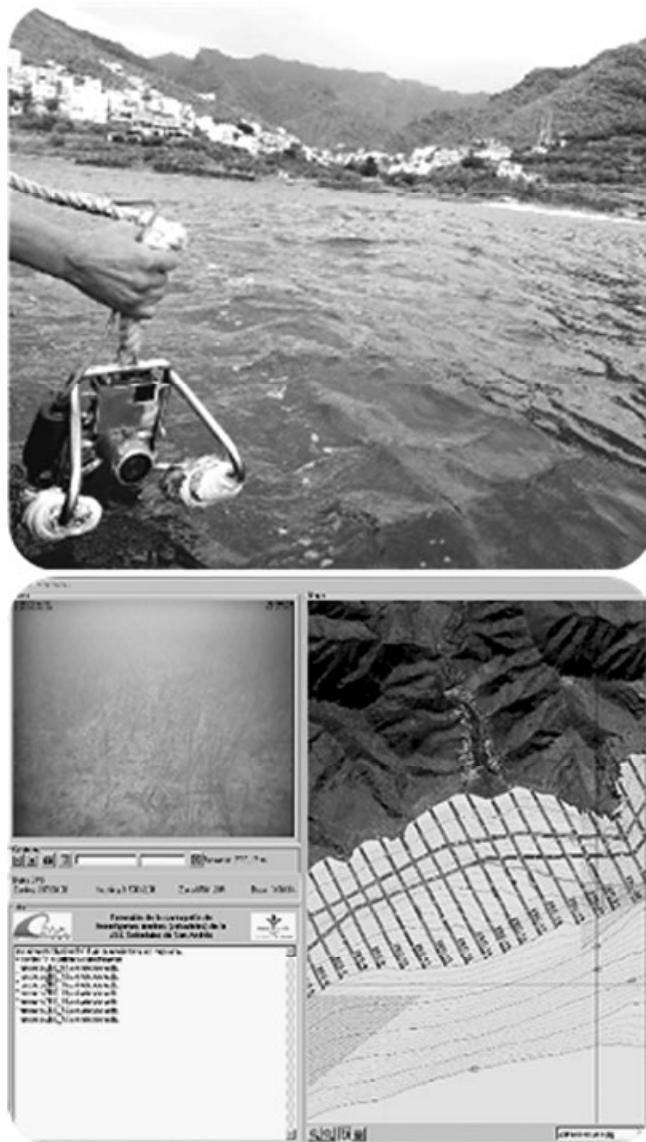


Fig. 15. Cartografiado con cámara de video de arrastre.

Una vez realizadas las campañas, tratados los datos del sonar y visualizados todos los vídeos, se dispone de todos los datos para realizar la identificación y caracterización inicial de las comunidades y hábitats presentes en los fondos recorridos. Esta información, junto con los datos batimétricos y cartográficos de la zona, se incorpora a un Sistema de Información Geográfica (SIG), para posteriormente realizar los trabajos de digitalización, generación de cartografía, cálculo de áreas y elaboración de los mapas bionómicos (Fig. 16).

Elaborados estos mapas dispondremos de una información detallada sobre las comunidades presentes en la zona del vertido y que pueden resultar afectadas.

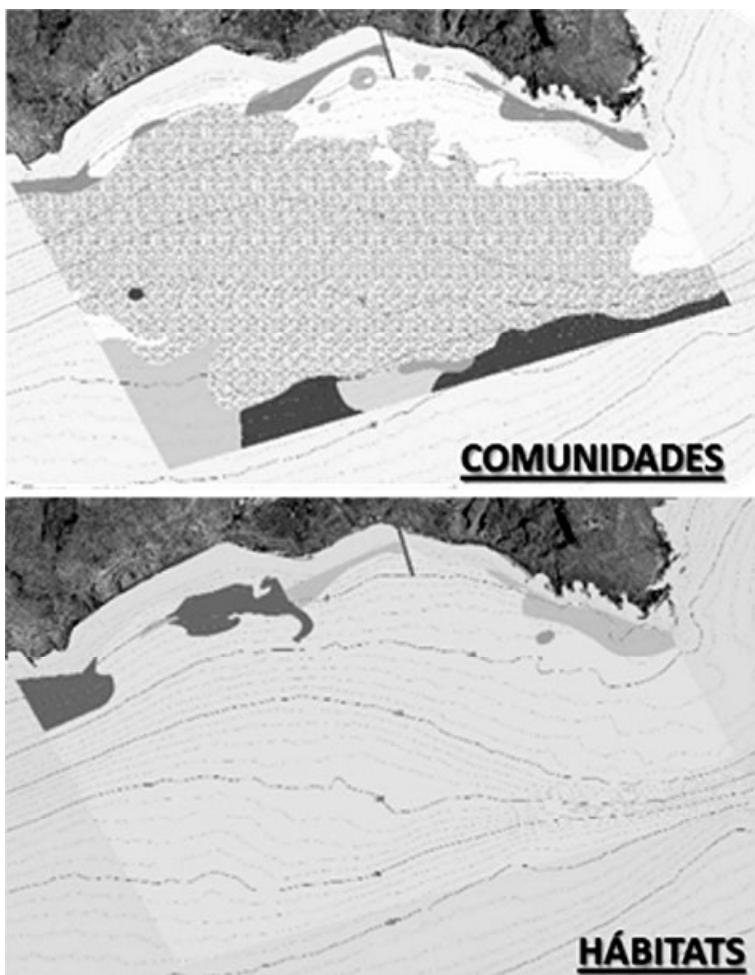


Fig. 16. Mapas generados de comunidades y de hábitats.

Estudio de la Calidad de Agua

Paralelamente a la campañas de cartografiado, se debe realizar una campaña de caracterización de la calidad el agua, tomando muestras tanto de manera puntual como a partir de perfiles oceanográficos para determinar la estructura vertical de las masas de agua.

Las estaciones de muestreo se deben situar cercanas al punto de vertido proyectado, pero seleccionando también algunas estaciones alejadas del mismo que nos servirán posteriormente de control.

Las tomas de muestras de agua superficial se realizan desde una embarcación, con la ayuda de una botella oceanográfica Niskin (Fig. 17), que permite la recogida de un volumen de agua constante debido a su estanqueidad, a la profundidad deseada. Una vez izada, el agua se trasvaza al tipo de botellas necesario según el parámetro a analizar y posteriormente, se codifica con una nomenclatura que permite la identificación unívoca de la muestra para su posterior análisis en el laboratorio (Fig. 17). Las muestras de agua se transportan al laboratorio de forma inmediata, en recipientes isotermos y refrigerados, evitando así la degradación de las mismas.

El proceso de toma de muestras se realiza siguiendo las indicaciones expuestas en la Guía para la Conservación y Manipulación de las Muestras de Agua (Norma UNE-N ISO 5667-3). Todos los análisis físico-químicos y microbiológicos de aguas se efectúan utilizando métodos oficiales y normalizados (normas UNE, ISO, Standard Methods, EPA, etc.).

Los perfiles oceanográficos se realizan con sonda multiparamétrica o CTD, para establecer las características físico-químicas de la masa de agua (Fig. 18). Las sondas multiparamétricas permiten medir un cierto número de variables y parámetros oceanográficos, y suelen tener como base una sonda CTD (acrónimo del inglés para Conductividad, Temperatura, Profundidad). Esta tecnología permite la toma de datos en continuo de la totalidad de la columna de agua. A medida que el instrumento se sumerge en el agua, las mediciones de cada una de estas variables son almacenadas en un *datalogger* (registrador de datos).

Los parámetros medidos en cada punto de muestreo, suelen ser los siguientes: profundidad (m), temperatura (°C), pH (ud. pH), turbidez (NTU), salinidad (ppt), oxígeno disuelto (mg/l) y Clorofila a ($\mu\text{g/l}$) (Fig. 19). La sonda o CTD se calibra en el laboratorio justo antes del muestreo, con la excepción de los sensores de oxígeno disuelto y de profundidad, que deben calibrarse *in situ* en la zona de muestreo, ya que estos son sensibles a los cambios de presión que puedan sufrir durante su traslado. Además, de forma periódica se deben realizar verificaciones en el laboratorio que garantizan el buen funcionamiento de este instrumental.



Fig. 17. Muestreo de aguas con botella Niskin y recipiente de muestras.

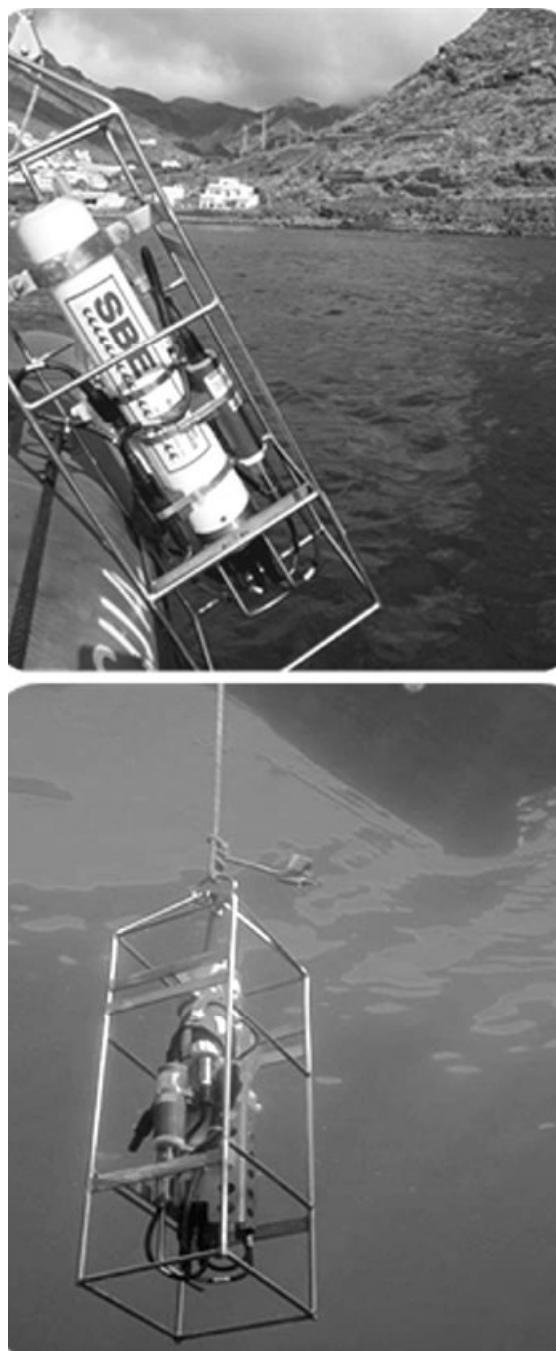


Fig. 18. Realización de mediciones con CTD.

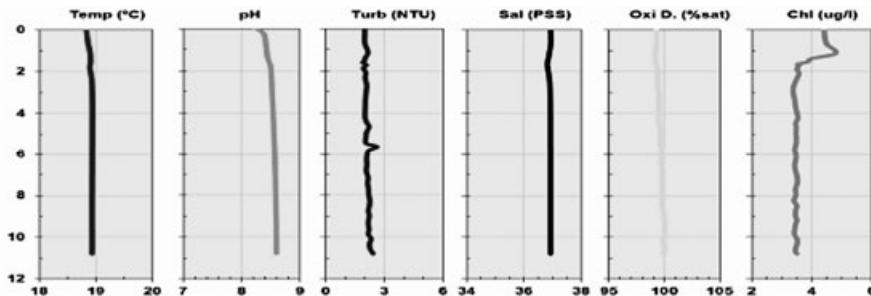


Fig. 19. Ejemplo de perfiles oceanográficos obtenidos en una estación de muestreo.

Estudio de la Calidad del sedimento

De igual manera es necesario efectuar el estudio de la calidad de los sedimentos en la zona donde se proyecta la realización de un vertido. Para ello se recolectan muestras, bien directamente a mano con buceadores que utilizan un *corer* (tubo de PVC de diámetro conocido con tapas encajadas a presión) que introducen en el sedimento 20 o 30 cm, o indirectamente a partir de dragados obtenidos desde una embarcación, utilizando una draga tipo Van Venn, que consiste en dos cubetas de muestreo sujetas a dos brazos largos que actúan a modo de palanca y facilitan el cierre de la draga (Fig. 20).

Con las muestras de sedimento se realizan por un lado los análisis de los parámetros físico-químicos, transportando parte del sedimento al laboratorio inmediatamente y en recipientes isotermos y refrigerados, y además se hace un estudio de los organismos presentes en el sedimento que se conoce como infauna. Para la extracción de la infauna, las muestras se tamizan y posteriormente, se lleva a cabo el triado de los diferentes grupos taxonómicos (crustáceos, moluscos, equinodermos, anélidos, etc.) en bandejas plásticas de base ancha (Fig. 21). En el laboratorio se procede a la identificación de todos los ejemplares bajo lupa binocular de gran potencia y microscopios ópticos, cuantificando el número de ejemplares para cada especie.

Con la información obtenida del estudio de la infauna, se confeccionan bases de datos y hojas de cálculo con las abundancias de las especies macrofaunales, que serán utilizadas para calcular el índice M-AMBI ('Multivariate-AZTI's Marine Biotic Index'). Este es un índice multimétrico diseñado para evaluar el estado ecológico del bentos de fondos blandos en las aguas marinas y transicionales europeas, utilizando como bioindicadores a macroinvertebrados bentónicos. Es el resultado de

integrar el índice AMBI, un índice biótico basado en la sensibilidad/tolerancia de las especies, junto con datos de diversidad (Índice de Shannon, H') y riqueza. Este índice, siguiendo los requisitos de la Directiva Marco del Agua, varía entre 0 (mal estado) y 1 (muy buen estado).



Fig. 20. Muestreo de sedimentos con corer y draga.



Fig. 21. Triado e identificación de muestras en el laboratorio.

Con toda esta información estamos en disposición de realizar los análisis de impactos potenciales en el medioambiente (ámbito marino), en las fases de ejecución y explotación de las diferentes alternativas de un proyecto de vertido de tierra al mar. Es en ese momento cuando se efectúa una valoración acerca de la compatibilidad o no del proyecto con el medioambiente, evaluando los efectos previsibles directos o indirectos sobre la población, la salud humana, la flora, la fauna, la biodiversidad, la geodiversidad, el suelo, el subsuelo, el aire, el agua, los factores climáticos, su incidencia sobre el cambio climático, el paisaje y los bienes materiales, incluido el patrimonio cultural. Asimismo, se considera la interacción entre todos estos factores.

Si el proyecto puede afectar directa o indirectamente a uno o varios espacios incluidos en la Red Natura 2000, así como a otros espacios protegidos, se debe elaborar un apartado con la evaluación de sus repercusiones, teniendo en cuenta los objetivos de conservación del espacio.

De acuerdo con la información ambiental recopilada y el análisis de impactos potenciales en el medio ambiente y en la Red Natura 2000, se tiene que valorar la compatibilidad del proyecto con los objetivos de la estrategia marina de la demarcación canaria.

En todo caso, el estudio debe contemplar una serie de medidas preventivas, correctoras y compensatorias en la fase de ejecución del proyecto. Finalmente se propondrá un Plan de Vigilancia Ambiental diseñado de tal manera que permita detectar de forma inmediata las posibles afecciones medioambientales del vertido.

Discusión

La sociedad del siglo XXI ha adquirido una mayor conciencia de la interdependencia entre el hombre y el medioambiente, y por tanto de la necesidad de una adecuada conservación y gestión de los recursos naturales. Frente a este planteamiento nos encontramos con problemas graves en la gestión eficaz de nuestro recurso más valioso, el agua.

La situación actual y las perspectivas de futuro en relación al problema de los vertidos en Canarias siguen siendo más preocupantes que hace una década, si cabe, ante la manifiesta insuficiencia de las respuestas dada a los problemas. Por un lado, la sociedad se está transformando a un ritmo cada vez más acelerado, y por el otro, la administración del medioambiente está yendo a la zaga del desarrollo económico y social pues el rápido crecimiento de la población aumenta las presiones sobre el medioambiente. Parece complicada la interacción entre los sistemas humanos (especialmente de tipo económico, social, político, cultural y tecnológico) y los sistemas ambientales (biosfera y geosfera). Lo que si podemos aceptar

como obvio es que mientras no se priorice a la gestión ambiental frente a otros intereses, el problema de los vertidos existirá y probablemente se acentuará. Podemos cambiarlo dotando a la administración competente de más medios, dándoles cobertura y alcance a proyectos no solo reparadores u orientados a superar tensiones y presiones electorales, sino aquellos que incorporen una integración ambiental continua y una ética ecológica viable.

Tenemos un marco legislativo, que aunque sea mejorable, es muy amplio en materia ambiental, lo que se requiere son los medios para poder aplicar las diferentes directivas ambientales. Aún hoy, los estudios ambientales, que deben ser el principal instrumento preventivo de los posibles impactos, son vistos por parte de la sociedad como un “impuesto revolucionario”. Aunque resulte fatigosa la cantinela, debemos aceptar el desarrollo sostenible como un modelo de referencia mirando al futuro, y para ello a nivel local es urgente mejorar la gestión del agua en Canarias, puesto que es uno de sus males ecológicos más acuciantes.

Creemos que actualmente estamos en una posible transición que podría alejarnos de los procesos de insostenibilidad y encontrar soluciones al problema de los vertidos de tierra al mar en Canarias. Se requieren acciones políticas y estrategias de desarrollo que encaren los procesos de cambio hacia la sostenibilidad y la transición ecológica.

En consecuencia con lo expresado, desde CIMA queremos recordar que deseamos una sociedad, mejor unida que disgregada, con intereses comunes y respetuosa con el medioambiente.

Bibliografía

DECISIÓN DE LA COMISIÓN de 20 de septiembre de 2013 por la que se fijan, de conformidad con la Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, los valores de las clasificaciones de los sistemas de seguimiento de los Estados miembros a raíz del ejercicio de intercalibración, y por la que se deroga la Decisión 2008/915/CE.

DECRETO 49/2015, 9 abril, por el que se aprueba definitivamente el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de Tenerife (BOC nº 85, 06/05/2015).

JUANES, J.A., X. GUINDA, A. PUENTE & J.A. REVILLA (2008). Macroalgae, a suitable indicator of the ecological status of coastal rocky communities in the NE Atlantic. *Ecological Indicators* 8: 351-359.

REAL DECRETO 399/2013, de 7 de junio, por el que se aprueba el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Occidental (BOE nº 137, 08/06/2013).

REAL DECRETO 817/2015, de 11 de septiembre, por el que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental (BOE nº 219, 12/09/2016).

5. Aguas residuales y oportunidades asociadas a su depuración y regeneración

Luisa Vera

*Dpto. Ingeniería Química y Tecnología Farmacéutica.
Universidad de La Laguna*

De entre todas las aguas: dulces, saladas, subterráneas, etc. las aguas residuales son por origen y características las innobles y olvidadas. Y si bien en el siglo pasado, se avanzó en la búsqueda de vías para minimizar los efectos negativos de su devolución al medio natural, lo cierto es que en el siglo XXI siguen constituyendo un tema escabroso. En general, las aguas residuales no son tema de conversación, y únicamente se hace referencia a ellas en los medios de comunicación, si aparecen en forma de vertido en una costa, son el resultado de un incidente o accidente. En contadas ocasiones, en foros no técnicos, se hace referencia a las aguas residuales como un recurso, capaz de generar productos de valor.

En el presente capítulo se ha intentado describir la situación general de las aguas residuales y su gestión actual así como, las oportunidades que nuevos modelos de gestión y de tratamiento pueden aportar para afrontar los retos que ha de abordar nuestra sociedad por medio de soluciones integradas, autónomas y sostenibles, en el ámbito de las aguas residuales.

Introducción

¿Qué es el agua residual?

Las aguas residuales son aquellas que proceden de las actividades humanas que se desarrollan en: núcleos urbanos, procesos industriales, agrícolas y ganaderos, mineros. Por tanto, son el resultado de incorporar en las aguas de abastecimiento, durante su uso: materia (heces, orina, jabones, arenas, etc.) y energía (en general, en forma de calor en aguas de procesos, como en centrales térmicas, aguas de limpieza, etc.). Las aguas residuales son sinónimo de contaminación pues tal y como define la Directiva Marco del Agua, la contaminación es “la introducción directa o indirecta, como consecuencia de la actividad humana, de sustancias o calor en la atmósfera, el agua o el suelo, que puedan ser perjudiciales para la salud humana o para la calidad de los ecosistemas acuáticos, o de los ecosistemas terrestres que dependen directamente de ecosistemas acuáticos, y que causen daños a los bienes materiales o deterioren o dificulten el disfrute y otros usos legítimos del medio ambiente” (DOUE 2000/60/CE).

El uso a que se destinan las aguas de abasto o potables originará aguas residuales con diferentes materias o impurezas, en diferente cantidad o concentración, y será el grado o extensión en que aparezcan estas impurezas las que determine el nivel de contaminación de estas aguas y su clasificación. Por ello, no es extraño que para poder facilitar su control y estandarización, las aguas residuales se clasifiquen según su procedencia o tipo de uso y esto generalmente, defina el tipo de impurezas a encontrar. No obstante, hay que ser consciente de que no necesariamente puede considerarse por ejemplo, un agua residual como industrial porque se genere en una industria, pues puede ocurrir que las aguas procedan de la cafetería y los aseos existentes en una instalación industrial, y sus características sean idénticas a las presentadas por un agua residual producida en una residencia escolar o de ancianos o un edificio de viviendas. Por tanto, no sólo el origen, sino el tipo de impurezas y su concentración serán factores determinantes para clasificar las aguas residuales.

En general, se habla de aguas residuales pluviales, aguas residuales industriales, aguas residuales de ganadería, y aguas residuales urbanas. Estas últimas también se denominan domésticas o municipales.

El término “aguas residuales urbanas” incluye las aguas residuales domésticas o la mezcla de estas con aguas residuales industriales o con aguas de escorrentía pluvial cuando las redes de saneamiento alcantarillado recogen también las pluviales. Por otra parte, las aguas residuales domésticas son las aguas residuales procedentes de zonas de vivienda y de servicios, generadas principalmente, por la higiene personal (duchas, baños,

lavabos), residuos del metabolismo humano (heces y orina) y otras actividades domésticas (lavadoras, lavaplatos, etc.).

La situación global de las aguas residuales en España

En julio de 2018, la comisión europea recordó a España su incumplimiento en materia de gestión y recogida selectiva de residuos sólidos así como, en el tratamiento adecuado de las aguas residuales. Siendo este último ámbito el que ha llevado a que el tribunal de justicia de la Unión Europea imponga a España su primera sanción pecuniaria ambiental por valor de 12 millones de euros y casi 11 millones adicionales por semestre de demora en cumplir la normativa ambiental de referencia. Esta sanción es el resultado de las denuncias a 17 municipios de 5 comunidades autónomas: Andalucía, Asturias, Galicia, Comunidad Valenciana y Canarias (Díaz, 2019).

Es importante indicar que si bien España realizó un gran esfuerzo por transformar la gestión de las aguas residuales en las últimas décadas del siglo XX, logrando revertir una situación deficiente en términos de cobertura y calidad del servicio hasta unos niveles inéditos hasta entonces, varios factores llevaron a un colapso generalizado de dicho avance en la segunda década del nuevo siglo (IAGUA 2019). La llegada de la crisis económica junto al corte de recepción de fondos comunitarios, ha contribuido junto a una falta generalizada de previsión política, en los diversos niveles de competencias de la administración, a diezmar los esfuerzos en recolección y tratamiento de las aguas residuales. Esto ha llevado al país a transitar por una senda de regresión impropia de un país desarrollado, que aspira a mejorar año tras año su entorno y a las indicadas multas (IAGUA, 2019).

En la actualidad, España recoge el 96,9% de las aguas residuales y somete a tratamiento el 84,1%, pero quedan 700 aglomeraciones urbanas que no cumplen las exigencias comunitarias, sobre las que pesan cinco procedimientos de infracción, incluyendo el ya fallado. La inversión para cumplir la normativa, y cerrar los procedimientos, asciende a unos 10.000 millones; según las últimas previsiones, no se conseguirá hasta el período 2027-2030 (Steggman, 2017).

Además de incumplir en materia de depuración, España debe medir mejor las extracciones y los usos del agua -acabar con la extracción descontrolada-, y cumplir los plazos de la Planificación Hidrológica (Díaz, 2019).

Por tanto, parece indispensable buscar nuevas fórmulas para afrontar los retos indicados en materia de agua y los correspondientes en materia de residuos sólidos o emisiones a la atmósfera. Aumentar los impuestos

ambientales que en la actualidad son los quintos más bajo de la Unión Europea, reduciendo la carga fiscal sobre el trabajo, podría ser una vía que se plantea como una opción para dar mayor visibilidad a la problemática ambiental y aumentar la sensibilización hacia esta temática, aplicando la máxima de “quien contamina paga”. No obstante, implementar una medida de este alcance requiere de un compromiso entre las diferentes administraciones, una visión a medio-largo plazo que posibilite el desarrollo normativo y los programas de actuación necesarios así como, desarrollar una sinergia compleja que requerirá el coraje de la clase política y la concienciación ciudadana.

Un informe de la ONU de marzo de 2017 indicaba que los niveles de tratamiento de las aguas residuales alcanzan de media, el 70% en los países ricos, una proporción que cae hasta el 38% en los países de renta medio-alta y se reduce al 28 % en los de renta medio-baja.

Según el Instituto Nacional de Estadística (INE), una familia española gasta de media el 0,9% de su presupuesto anual en el recibo del agua, mientras que su gasto en teléfono le supone casi el 3%, y lo mismo para electricidad. Según Morcillo, el esfuerzo que hace una familia española para pagar el agua es el 63% del que hace la media europea. Puesto que la tarifa del agua está constituida por todos los servicios, es decir, abastecimiento y saneamiento (alcantarillado y depuración), el precio que paga una familia española es un 60% por el abastecimiento y un 40% por el saneamiento.

En España se reutilizan alrededor de 400 hm³, lo que representa un 9% de las aguas residuales depuradas. Respecto al destino del agua reutilizada, el 41% es la agricultura, el 31% es el riego de jardines y zonas de ocio, el 12 % a usos industriales, y el 9 % a usos varios (Stegmann, 2017).

Aguas residuales y riesgos asociados

Cada habitante español produce un volumen medio diario de 144 litros de aguas residuales urbanas según el Instituto Nacional de Estadística (INE, 2016), constituidas en proporciones prácticamente regulares, por aceites e hidrocarburos; sales, bases jabonosas y almidones, urea, albúminas, urea, proteínas, ácido acético, microorganismos y diferentes gases. Este amplio abanico de componentes se agrupa por consenso, en los denominados: “indicadores de contaminación de las aguas residuales”. Dichos indicadores son básicamente, parámetros de naturaleza física, química o biológica que aglutinan a varios de los componentes mencionados a fin de facilitar la caracterización de las aguas, normalizando métodos para su cuantificación y economizando tiempo y dinero asociado al número de análisis necesarios, de todo tipo.

Los rangos que estos indicadores de contaminación pueden presentar nos ayuda a definir el carácter más o menos contaminante de un agua residual, pero también nos permite realizar un seguimiento cuantitativo y objetivo de un proceso de tratamiento depuración que implantemos, conocer qué limitaciones puede tener, qué factores lo hacen más o menos adecuado para ser aplicado y lo más importante, ante posibles sanciones: saber si el tratamiento es o no eficaz y el agua resultante cumple o no, la normativa.

Entre estos indicadores de contaminación, por su papel relevante en las normativas de depuración, vertido, el control de calidad de los tratamientos, etc. destacan los “Sólidos en suspensión” que contabilizan las especies con un diámetro medio de partícula superior a $0,45 \mu\text{m}$, entre las cuales se encuentran desde bacterias o algas, hasta arenas. Comprende por tanto, un tipo de contaminantes de las aguas que en su gran mayoría pueden verse a simple vista y en consecuencia, es un parámetro relacionado con el aspecto antiestético que acompaña a lo que de manera intuitiva, consideramos un agua contaminada o un agua residual.

También entre los contaminantes presentes en aguas residuales se encuentra la materia orgánica biodegradable ligada con su procedencia, principalmente aguas fecales que salen de nuestros inodoros, restos de comida que acompañan a aguas de lavado de vajillas y utensilios de cocina, duchas, etc. y que está compuesta porcentualmente en un 20-25% de azúcares, 40-60% son aminoácidos y alrededor de un 10%, ácidos grasos. Estas especies de carácter biodegradable es decir, degradables por la acción de seres vivos, no son cuantificadas de manera independiente por medio de métodos específicos y por ello, más caros, sino por medio de un único parámetro: la “Demanda Bioquímica de Oxígeno-DBO” que cuantifica las necesidades de oxígeno de los microorganismos presentes en el agua residual en el proceso de degradación de estos compuestos biodegradables y que estos llevan a cabo, de manera espontánea.

Por otra parte, otras muchas especies presentes en las aguas residuales no son biodegradables, pero si oxidables en presencia de una sustancia química con gran capacidad oxidante. Esta última circunstancia permite cuantificar las especies a oxidar, conociendo la concentración de oxidante necesaria para dicha oxidación expresada como si se tratase de oxígeno como la “Demanda Química de Oxígeno-DQO”.

Obviamente algunas sustancias aparecen inevitablemente por su naturaleza, cuantificadas en más de uno de estos indicadores, si bien esto no es un problema pues el valor global de cada parámetro es el que define y se aplica en la clasificación de las aguas y el diseño de instalaciones de tratamiento o vertido. De hecho, atendiendo al valor medio que presentan estos indicadores en las aguas residuales, estas se clasifican según su nivel de contaminación: poco, medio o fuerte. Esto que puede parecer

únicamente una curiosidad explica que en ocasiones, algunas tecnologías de tratamiento aplicadas con éxito a unas aguas residuales resulten poco eficientes para tratar otras. Así por ejemplo, los datos recopilados por el ISTAC (Instituto Canario de Estadística) en 2009 (último año disponible) en relación a las aguas residuales urbanas producidas en Canarias, indican que estas presentan un nivel de contaminación fuerte tal y como se recoge en la Tabla 1. Esto requiere diseñar instalaciones de tratamiento más exigentes, que deben gestionar aguas residuales más complejas, por su alta concentración y por no generarse caudales por habitantes muy elevados en comparación con los de otras regiones, es decir las aguas residuales canarias están en general, más cargadas de contaminantes.

Tabla 1. Clasificación de las aguas residuales urbanas según su nivel de contaminación (Adaptado Metcalf & Eddy, 1995).

Contaminante (mg/l)	Concentración			CANARIAS ISTAC (2009)
	Débil	Media	Fuerte	
Sólidos en suspensión (mg/l)	100	220	350	350
Demandा bioquímica de oxígeno (mg/l)	110	220	400	565
Carbono orgánico total (mg/l)	80	160	290	
Demandा química de oxígeno (mg/l)	250	500	1.000	905
Nitrógeno total (mg/l)	20	40	85	64
Fósforo total (mg/l)	4	8	15	5
Coliformes totales (UFC/100ml)	10^6 - 10^7	10^7 - 10^8	10^7 - 10^9	

El vertido de agua residual urbana sin tratar puede tener efectos adversos sobre el medio receptor (terrestre o marino) y la salud de las personas. Por un lado, el agua residual contiene mayoritariamente sustancias procedentes de la actividad doméstica que pueden modificar las características físico-químicas del medio receptor y, como consecuencia, la pérdida de su función ecológica. Además, estas aguas sin tratar pueden contener numerosos microorganismos, causantes de enfermedades intestinales graves en humanos como tifus, cólera, disentería y hepatitis A. Esto es algo que se sabe desde hace siglos, de hecho los antiguos romanos conocían la problemática sanitaria asociada a las aguas residuales y construyeron una red de alcantarillado, la “cloaca máxima”, para recoger las aguas residuales de Roma y conducirlas lejos de la población hasta el río Tíber. Esta filosofía la trasladaron a las provincias romanas, como Itálica (Sevilla). Además llenaron sus casas y palacios de letrinas que permitieran la recogida de las aguas y su transporte hasta la red general (Fig. 1). Sin embargo, el abandono de estas instalaciones tras la caída del imperio romano y el ingreso del ser humano en la edad media, época repleta de oscurantismo e ignorancia, llevó a deshacerse de las aguas residuales

vertiéndolas directamente a las calles, contribuyendo a que la población conviviese con sus residuos en unas condiciones insalubres que contribuyeron a las grandes epidemias de aquellos siglos.



Fig. 1. Letrinas y red de canalización en los restos arqueológicos de Itálica, antigua ciudad romana situada al norte de la localidad de Santiponce (Sevilla).

Otra consecuencia del vertido de aguas residuales al medio receptor es el consumo de oxígeno disuelto en dicho medio, que puede reducir su presencia de manera dramática e incluso, llevárselo a estar ausente. Este efecto en el medio, denominado anoxia, afecta a los seres vivos presentes.

Asimismo, el vertido de nutrientes contenidos en las aguas residuales sobre medios acuáticos, estimula el crecimiento de plantas acuáticas, dando lugar al proceso conocido como eutrofización, cuyo efecto principal es el crecimiento incontrolado de algas que impiden la penetración de la luz en las zonas más profundas donde deja de tener lugar la fotosíntesis y la consecuente generación de oxígeno. Asimismo, el enriquecimiento de materia orgánica que experimentan los sedimentos en las zonas de influencia de los vertidos y el incremento de su descomposición influye en las comunidades biológicas existentes. Esto tiene como consecuencia la alteración radical del ambiente por cambios en la composición, estructura y dinámica del ecosistema haciendo inviable la existencia de la mayoría de las especies que previamente formaban el ecosistema y su desaparición como tal.

Consciente de los riesgos y el conjunto de afecciones asociados al vertido de aguas residuales sin tratar ha impulsado el desarrollo de diferentes normativas por parte de la Unión Europea. Por ejemplo, para el caso de vertido a aguas costeras entre otras problemáticas que puedan resultar una amenaza para las mismas, se ha desarrollado la Directiva Europea 2006/7/CE, relativa a la gestión de la calidad de las aguas de baño, entre las que destaca la clasificación de la calidad de las aguas de baño en función de los niveles de bacterias fecales detectadas: Enterococos intestinales y *Escherichia coli*. Además hay que considerar otra cuestión ante los vertidos, el hecho de que estos pueden contener concentraciones de sustancias que pueden resultar perjudiciales para los organismos del medio por su toxicidad y capacidad de bioacumulación, siendo un fuente común de perturbación antropogénica (Riera *et al.*, 2013).

En el caso de que las aguas residuales sin tratar sean vertidas directamente al suelo o infiltradas en el subsuelo sin un tratamiento previo adecuado, provocan un problema ambiental quizás más inquietante que el que se puede visualizar en la costa o en una playa. Por lo general, sobre el primer problema las autoridades pueden actuar, alertando a la población para minimizar los riesgos asociados. En el caso de la infiltración de aguas residuales en el subsuelo, el peligro asociado es silencioso y tomar conciencia de él resulta más complejo.

Con el fin de regular el vertido de las aguas residuales urbanas, la Unión Europea promulgó la Directiva 91/271/CEE – transpuesta al marco español a través del Real Decreto (RD 509/96) sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas y posteriormente, desarrolló la Directiva Marco del Agua 2000/6/CE para la preservación de las grandes masas de agua

(Tabla 2). Es en base a la primera de estas normativas, que España y algunos otros países europeos han sido sancionados por la ausencia o la deficiencia en el tratamiento de las aguas residuales procedentes de núcleos urbanos en 2018.

Tabla 2. Concentraciones y rendimientos mínimos de los procesos de depuración de aguas residuales urbanas (RD 509/96)

Parámetros	Concentración	Porcentaje de reducción
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅ a 20°C)	25 mg/l O ₂	70-90%
Demanda química de oxígeno (DQO)	125 mg/l O ₂	75%
Sólidos en suspensión (SST)	35 mg/l 60 mg/l	90% (> 10.000 h-e) 70% (2.000 – 10.000 h-e)

En zonas sensibles a eutrofización:

Parámetros	Concentración	Porcentaje de reducción
Nitrógeno total	10 mg N/l (>10.000 h-e) 15 mg N/l(10.000-100.000 h-e)	70-80%
Fósforo total	1 mg P/l (>10.000 h-e) 2 mg P/l(10.000-100.000 h-e)	80%

Algunas cifras de las aguas residuales en Canarias

En 2016, según datos del ISTAC, se generaron en el conjunto de Canarias unos 341.769 m³/día de agua residual doméstica, de los cuales un 77,9% fueron vertidos al mar y el 0,2% del agua residual tratada se vertió por infiltración en el terreno.

En Canarias se han realizado notables inversiones en las últimas décadas para dotar a las islas de infraestructuras para la recogida y tratamiento de aguas residuales, pero estas resultan en la actualidad, insuficientes. El grado de desarrollo de las redes de saneamiento y el número y capacidad de las estaciones de tratamiento no dan servicio a un porcentaje razonable de la población. A ello contribuyen diversos factores específicos: la especial orografía de algunas islas, la complicada red de atribuciones y competencias entre las diversas administraciones locales y sus departamentos, la dispersión poblacional en el territorio, la elevada carga orgánica y salinidad del agua residual, etc.

Un inventario realizado en 2008 por el Gobierno de Canarias (Parlamento de Canarias, 2016) indicaba la existencia de unos 500 puntos de vertidos de aguas residuales al mar, de los cuales unos 200 son vertidos

directos al mar (sin canalización), y otros 312 mediante conducciones a emisarios (emisarios submarinos o aliviaderos de emergencia de estaciones de bombeo). Una década después, un nuevo informe publicado en noviembre de 2017 arrojaba un total de 394 puntos de vertido, de los cuales 49 son emisarios submarinos, 306 son conducciones de desagüe y 30 son instalaciones en Dominio Público Marítimo Terrestre (DPMT). De estos 394 puntos de vertidos al mar, 224 corresponden al vertido exclusivo de aguas residuales urbanas o domésticas, aquellas generadas en los hogares o instalaciones análogas: cafeterías, colegios, residencias, etc.

La isla de Tenerife cuenta con una superficie aproximada de 2.034 km² que constituye el 27% del territorio insular regional, y según los últimos datos recogidos por el ISTAC en el 2018, en Tenerife habitan unas 904.713 censadas, cerca de la mitad de la población total de Canarias. A todo ello también es necesario sumar los cerca de 7.000.000 de turistas que visitan la isla anualmente, sin incluir al resto de la población flotante de la isla. Con estos datos es revelador la presión que las aguas residuales pueden ejercer sobre el medio receptor, sea terrestre o marítimo. De hecho, por los datos del **PLAN HIDROLÓGICO DE SEGUNDO CICLO DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DE TENERIFE (2015-2021)** (Consejo Insular de Aguas de Tenerife, 2018), se estima el volumen de aguas residuales generadas en Tenerife en 2015, por la población residente y el turismo, en 68,8 hm³/año. El 56% de estas aguas residuales fueron recogidas por las redes centralizadas de saneamiento y solamente un 39,3% de las recogidas fueron depuradas.

La memoria del Plan Hidrológico Insular de Tenerife (Consejo Insular de Aguas de Tenerife, 1996), indicaba que en 1996 sólo el 56% de la población se encontraba conectada a una red de saneamiento. Gran parte de los hogares de la isla que no están conectados a las redes de saneamiento recurren a pozos ciegos o filtrantes para evacuar sus aguas residuales, y estos dispositivos no pueden ser considerados un tratamiento “adecuado” de las aguas residuales. En otros casos, las viviendas disponen de fosas sépticas, que por lo general, carecen de la adecuada conservación, dando lugar a que se puedan producir infiltraciones en el terreno y eventos de contaminación difusa. Esto parece no haber preocupado en exceso a la ciudadanía, tal vez porque siguiendo la máxima de “Ojos que no ven, corazón que no siente”, la infiltración de aguas residuales poco tratadas en el subsuelo no se ha considerado hasta ahora como un problema, al anular su visión. De hecho, la utilización de pozos filtrantes no es cuestionada generalmente y términos como fosa séptica y pozo filtrante se confunden coloquialmente, a pesar de tratarse de instalaciones sensiblemente diferentes. Esto conlleva a que no se hagan grandes esfuerzos por cambiar una situación que la inercia, la falta de financiación o de medios, el desconocimiento, etc. ha convertido en habitual. Es cierto que no suele ser

una medida popular, el cierre de una calle para proceder a abrir zanjas, instalar conducciones, cerrar dichas zanjas, re-asfaltar las vías o acondicionar las aceras, adaptar las tarifas municipales para abordar la depuración, etc. Pero también es cierto que es obligación municipal recoger dichas aguas residuales, tratarlas de forma adecuada según indique la normativa, en función del núcleo o sector urbano implicado y disponerlas de manera segura. En ocasiones, mancomunar los servicios de saneamiento y depuración, al igual que se hace con la recogida de residuos sólidos urbanos, puede ser una solución que ayude a minimizar los costes. En todo caso, la distribución de los núcleos de población e incluso su tamaño o localización en un mismo municipio, puede ser muy diversa y por tanto, no hay una solución única.

Las maneras o criterios para disponer o verter agua residual o agua residual depurada, ya tratada, se encuentran reguladas principalmente por normativas de la Unión Europea. Estas están orientadas a preservar la calidad de las grandes masas de agua natural, que en islas como Tenerife, se encuentran alojadas en el subsuelo, en forma de acuíferos, cuya calidad pudiera verse comprometida en un futuro, dada la gran presión demográfica ejercida sobre el territorio. No obstante, la información que maneja el Consejo Insular de Aguas de Tenerife en torno a esta cuestión no revela por el momento, problemas de esta índole, si bien, sería aconsejable un plan de actuación que garantice que dicho escenario no pueda desarrollarse en un futuro. Para ello, es precisa una mayor implicación de la población, que reclame una inversión eficaz y prioritaria en materia de saneamiento y de depuración.

La depuración de las aguas residuales

La depuración de las aguas residuales define el conjunto de tratamientos a aplicar a un agua residual para adaptar sus características a las exigidas para poder ser vertidas a colectores municipales, aguas marítimas, aguas continentales, etc. Dichos tratamientos se abordan en las Estaciones de Depuración de Aguas Residuales (EDAR) diseñadas para alcanzar los siguientes objetivos (Hernández, 2015):

- Eliminación de residuos, aceites, grasas, flotantes, arenas, etc.
- Eliminación de materias sedimentables orgánicas e inorgánicas.
- Eliminación de la materia orgánica.
- Eliminación de compuestos nitrogenados, que contengan fósforo, especialmente si el vertido se va a realizar en una zona sensible.
- Transformar los residuos retenidos en fangos estables (sin peligro para la salud).

Para la consecución de estos objetivos, las estaciones depuradoras se basan en lo que se denomina, procesos unitarios. Estos procesos unitarios pueden ser de tipo físico, químico o biológico en función de si se aplican o neutralizan fuerzas de distinta naturaleza, se añaden determinadas sustancias o se recurre a organismos vivos para reducir la presencia en las aguas residuales de determinados parámetros: indicadores de contaminación. Estos procesos unitarios se suelen agrupar por etapas o fases que reciben nombres tales como tratamientos: previo, primario y secundario.

La etapa de tratamiento previo puede variar de una a otra estación depuradora según el caudal de agua residual a tratar, la discontinuidad del flujo de agua residual o el espacio disponible, pero su función es la misma: la reducción del contenido y del tamaño de los sólidos presentes en el agua residual. En el agua residual pueden encontrarse sólidos de gran variedad de tamaños, pensemos si no, en aquellos objetos que podamos tirar por el retrete o que puedan acceder a una alcantarilla si no está debidamente cerrada. Trozos de madera, plástico, telas, bastoncillos, compresas, papel higiénico, toallitas desechables, colillas, etc., constituyen ejemplos de estos objetos que aparecen con el agua residual en la cabecera o entrada de una estación depuradora. Estos cuerpos más o menos voluminosos, son por lo general, abrasivos y pueden provocar obstrucciones y roturas en tuberías, válvulas, bombas de impulsión, etc. y por ello, son los primeros elementos a retirar en las estaciones depuradoras (Fig. 2).

Además, en esta etapa se eliminan arenas, que podrían causar el desgaste y la rotura de equipos mecánicos como los mencionados anteriormente. Asimismo, se retiran aceites y grasas que puedan impedir por flotación, la sedimentación de arenas y sólidos finos. Esta etapa es la responsable generalmente, de la mayor parte de olores desagradables que se asocian a las aguas residuales y su proceso de depuración, y que son debidos a los gases que se producen durante la degradación de la materia orgánica adherida sobre estos sólidos. Realmente, se trata de un olor similar aunque más intenso, al que desprenden redes de saneamiento o alcantarillas en épocas secas, especialmente verano. En este sentido es importante aclarar que este tipo de generación de olores es habitual e independiente del tipo de estación depuradora por el que se opte, pues la eliminación de los sólidos mayores y esa materia orgánica en esta fase de la depuración es inevitable.

La siguiente etapa en el tratamiento de depuración, el tratamiento primario, comprende la decantación por acción de la gravedad, de los sólidos más finos, además de la flotación de aceites, grasas y otros flotantes más ligeros. Por lo general, en estaciones de mediana-gran capacidad de tratamiento, estos decantadores son elementos llamativos por ocupar un porcentaje elevado de la superficie disponible para el tratamiento.



Fig. 2. Equipo de cribado y eliminación de sólidos habitual en Tratamiento previo-primario de EDAR.

Las estaciones depuradoras de aguas residuales tienen como núcleo de la depuración, el tratamiento secundario también denominado, tratamiento biológico, pues recurre a organismos para degradar la materia orgánica presente en las aguas residuales. Esta materia orgánica procedente de las heces aportadas al agua, los restos de comida, etc. puede promover el desarrollo de todo tipo de microorganismos, algunos de ellos patógenos, es decir, causantes de enfermedades. Por tanto, es prioritario en el proceso de depuración, reducir el contenido en materia orgánica presente en las aguas antes de ser vertidas, a fin de minimizar los problemas sanitarios que puedan derivarse de ello.

El tratamiento secundario por excelencia es el proceso biológico de “lodos activados o activos” desarrollado a principios del siglo XX y tan extendido que ha recibido el apodo de “convencional”. Este proceso consta a su vez de dos elementos: un reactor biológico y un clarificador (Figs 3-5). En el reactor biológico se promueve el desarrollo de microorganismos aerobios, que requieren oxígeno para su desarrollo, inyectando aire en el seno del agua residual, rica en materia orgánica. De esta manera las bacterias degradarán y asimilarán la materia orgánica a una velocidad relativamente alta, generándose más bacterias que conformarán colonias y estas, a su vez se aglutinarán formando conglomerados o flóculos que

podrán separarse del agua por sedimentación. Esta sedimentación tiene lugar en el clarificador, elemento que actúa de forma similar al decantador del tratamiento primario. Si el aire incorporado al reactor se distribuye de manera adecuada y uniforme, se logrará una correcta homogeneización del agua residual, una adecuada distribución del oxígeno a todas las bacterias aerobias, y un buen rendimiento de depuración. La eficacia del tratamiento global puede verse perjudicado por la presencia de aceites que generen micelas y láminas que dificulten una buena transferencia del oxígeno al agua y por extensión, a las bacterias aerobias. También la formación de flóculos o aglomerados de bacterias es crucial para una adecuada sedimentación en el clarificador y la producción de aguas depuradas. Asimismo, una elevada y variable salinidad de las aguas residuales puede limitar, o incluso llegar a impedir, el correcto desarrollo de las bacterias responsables de la depuración (Asano *et al.*, 2007).

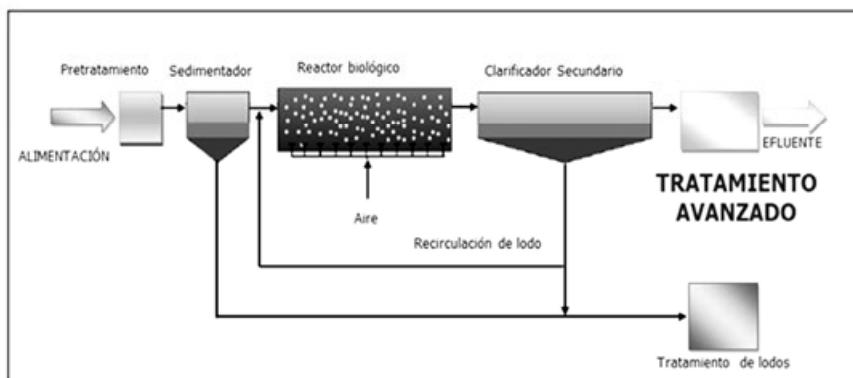


Fig. 3. Esquema del proceso de depuración de aguas residuales por lodos activos y tratamiento avanzado.

En ocasiones se puede recurrir a otros tratamientos secundarios, donde los microorganismos responsables de la depuración se encuentran libres en el agua residual al igual que en el proceso de lodos activos pero sin incorporar aire. Esto conlleva la coexistencia de microorganismos aerobios y otros que no requieren oxígeno, los anaerobios e incluso, un tercer tipo de microorganismos capaces de actuar con y sin oxígeno. En este caso, la depuración es más lenta pero el espacio requerido puede ser elevado, y al imitar el proceso de depuración que tiene lugar en ríos o lagunas, recibe el nombre de lagunaje artificial.

En otros casos: filtros biológicos y humedales artificiales de flujo horizontal sub-superficial, las bacterias encargadas de la depuración se desarrollan fijadas – adheridas a un soporte o relleno que puede ser de



Fig. 4. Reactores biológicos de lodos activos y clarificadores secundarios al fondo, en un sistema de lodos activos convencional.

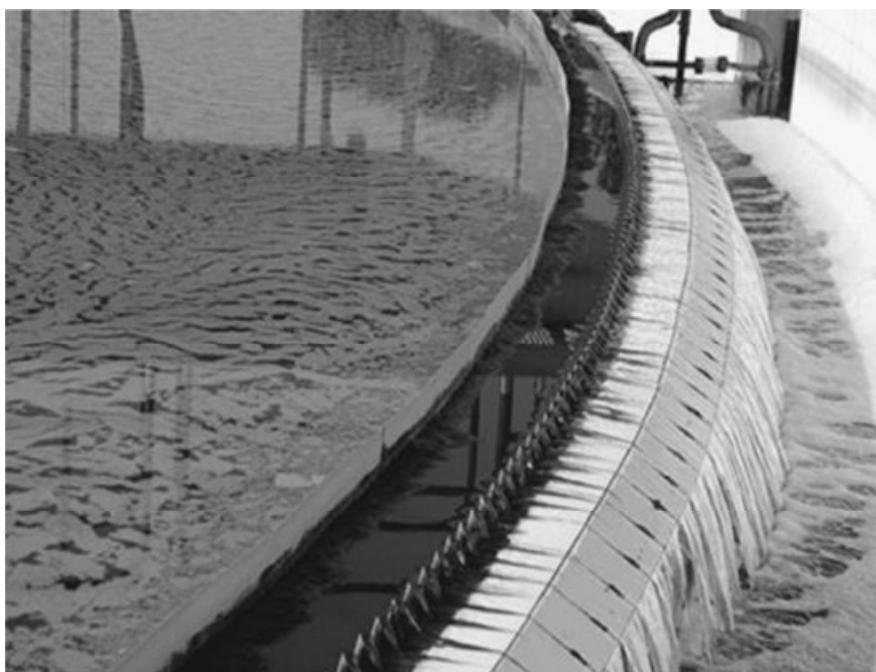


Fig. 5. Detalle de clarificador secundario de una EDAR convencional.

diversa naturaleza: plástico, cerámica, grava, y a través del cual fluye el agua residual a depurar. En este caso, también se desarrollan bacterias de distinta naturaleza y el proceso de depuración, más lento que en lodos activos, requiere más espacio.

Sea cual sea el tipo de tratamiento secundario, de tipo biológico, este debe facilitar el contacto entre la materia orgánica y la biomasa, dar tiempo de contacto entre bacterias y agua residual para que tenga lugar la metabolización de la materia orgánica. Sin embargo, en el caso del proceso de lodos activos, este debe además permitir la estructuración de las bacterias floculadas. Esto último es primordial para conseguir una decantación satisfactoria del flóculo que posibilite la clarificación y la consiguiente depuración de las aguas residuales, si bien en ocasiones, esto no es suficiente para que el agua depurada tenga una calidad aceptable no para ser vertida, sino para reutilizarla.

La regeneración de aguas residuales

En este punto, hemos de introducir un nuevo término: aguas regeneradas, con el que se refieren las aguas residuales depuradas que, tras el proceso de depuración han sido sometidas a un proceso de tratamiento adicional o complementario que permite adecuar su calidad al uso al que se destinan.

La incorporación de etapas adicionales de tratamiento en los esquemas habituales de las estaciones depuradoras (EDARs) ha dado lugar a un nuevo concepto “Estaciones Regeneradoras de Agua Residual” para referirse al conjunto de instalaciones donde las aguas residuales depuradas se someten a procesos de tratamiento adicional que puedan ser necesarios para adecuar su calidad al uso previsto (RD 1620/2007). En la actualidad el Real Decreto 1620/2007 regula a nivel nacional la calidad que debe cumplir un agua regenerada para un uso determinado, distinguiendo cuatro niveles principales de calidad según el destino final del agua: riego agrícola, uso urbano, industrial, recreativo y ambiental. Esta norma también prohíbe independientemente de su calidad, su reutilización como agua de consumo humano directo, en industrias alimentarias e instalaciones hospitalarias, entre otras, aunque si indica expresamente, la posibilidad de su aplicación en la recarga de acuíferos. El Real Decreto 1620/2007 establece los criterios de calidad atendiendo principalmente, a las concentraciones de nematodos intestinales, *Escherichia coli*, sólidos en suspensión y turbidez (Tabla 3).

Mejorar la calidad del agua residual depurada para transformarla en agua regenerada implica: retirar nutrientes, organismos patógenos, sales, por medio de tratamientos complementarios que se denominan terciarios o avanzados. Entre estos tratamientos avanzados, la filtración a través de

medios granulares, la desinfección con compuestos clorados, ozono, radiación UV o los procesos de membranas como micro o ultrafiltración, electrodiálisis reversible, etc. son los más habituales.

Tabla 3. Resumen del RD 1620/2007, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas (Adaptada de RD 1620/2007).

	Calidad Excepcional	Calidad I	Calidad II	Calidad III
<i>E. coli</i>	0/ausencia	100 UFC/100ml	1000 UFC/100ml	10^4 UFC/100ml
Sólidos en suspensión	10 mg/l	20 mg/l	35 mg/l	35 mg/l
Nematodos intestinales	1 huevo/10L	1 huevo /10L	1 huevo /10L	1 huevo /10L 10 NTU
Turbidez	2 NTU	10 NTU	No se fija	No se fija
Observaciones	Torres de refrigeración SST<5 mg/l Turbidez< 1 NTU	Riego de parque y baldeos de calles E. coli < 200 UFC/100 ml		Aguas de proceso Turbidez 15 NTU
USOS	Riego jardines privados. Descarga de aparatos sanitarios. Torres de refrigeración. Recarga de acuíferos por inyección.	Riego cultivos (consumo crudo y contacto directo). Campos de golf. Riego parques y jardines públicos. Baldeo de calles.	Riego cultivos (contacto directo y consumo no fresco). Agua proceso y limpieza de industrias alimentarias. Recarga acuíferos por percolación.	Riego cultivos industriales, viveros, leñoso, flores, etc. Agua de proceso y limpieza. Estanques y masa de agua sin acceso público Riego de pastos.

La implantación de tratamientos terciarios o avanzados ha proliferado en las estaciones depuradoras más antiguas, donde no es posible una remodelación completa de las mismas, como fórmula para afrontar la creciente demanda de agua de calidad, fundamentalmente para riego. De hecho, si se tiene en cuenta que las fuentes hídricas naturales, entendiéndose por éstas las subterráneas y superficiales, alcanzan los 111.000 hm³/año en España (MITECO, 2019) y que el sector agrícola

español consume en torno a un 80% de la capacidad hídrica disponible (Montoya *et al.*, 2016), resulta obvio que incorporar este nuevo recurso, “artificial” o “no convencional”, puede aliviar la presión sobre los recursos naturales de mayor calidad que deben ser destinados a consumo humano o usos industriales más exigentes, como la producción de alimentos, cosmética, etc.

Canarias fue una de las regiones pioneras en la implantación de sistemas de reutilización de aguas depuradas para riego a principios de la década de los 90 del siglo XX. En la actualidad, es la cuarta comunidad autónoma en porcentaje de reutilización respecto al volumen de agua depurado (INE, 2016) y el porcentaje volumétrico de agua depurada que es reutilizada representa un 27%, muy lejos del 62% que presenta la región de Murcia, pero muy superior a la media nacional situada en un 10%. En el caso concreto de la isla de Tenerife, la reutilización se ha convertido en una herramienta esencial para afrontar la escasez de agua, llegando a aportar el 55% del volumen de agua distribuido por BALTEN para riego de cultivos y campos de golf en 2018.

Por otra parte, es importante recalcar que la Directiva Marco del Agua supone un reto para la gestión del agua, ya que obliga a proteger y conservar los ecosistemas acuáticos promoviendo un uso sostenible de los recursos hídricos. Por tanto, no sólo se trata de proteger las aguas superficiales y subterráneas, sino también de cambiar el modelo de gestión, de forma que se fomente el ahorro y el uso eficiente del agua. En este sentido, la regeneración de las aguas depuradas, que consiste en tratar éstas hasta alcanzar la calidad requerida en función del uso final que se les desee dar, alcanzando incluso, grado de potabilidad, es fundamental. Así la combinación de factores como el aumento de la demanda en un escenario de cambio climático que conlleva períodos de sequías más habituales y prolongados, la necesidad de cumplir las directrices de la Directiva Marco del Agua y de otras directivas europeas posteriores, elaboradas para dar soporte a la primera han impulsado el interés por la reutilización de aguas.

Los biorreactores de membrana en la regeneración de las aguas

La apuesta de Canarias por la integración de la reutilización de agua regenerada en la gestión del ciclo agua queda patente en los planes hidrológicos insulares, no sólo en el de la isla de Tenerife. En línea con esta apuesta las nuevas estaciones de depuración y la ampliación de las más antiguas se han orientado hacia la construcción de biorreactores de membrana (en inglés, *membrane bioreactor-MBR*) (Fig. 6). Este proceso es

una modificación de los sistemas de lodos activos tradicionales, donde se sustituye el clarificador secundario por membranas, para producir un efluente clarificado y parcialmente desinfectado (Fig. 7). El reactor es similar al de los lodos activos pero opera con mayores concentraciones de microorganismos, lo que propicia elevados rendimientos en cuanto a eliminación de materia orgánica (Cote *et al.*, 2012). Incluso, según su configuración, se puede transformar el nitrógeno presente en las aguas residuales, cuyo vertido directo al medio natural puede generar episodios de eutrofización, en compuestos nitrogenados más asimilables por las plantas y en concentraciones no peligrosas para el entorno.



Fig. 6. Biorreactor de membranas de la EDAR del Noreste de Tenerife con tanque de membranas al fondo.

La normativa cada vez más exigente en cuanto a calidad de los recursos hídricos y el desarrollo de la industria de las membranas, han propiciado el desarrollo exponencial de los sistemas MBR en los últimos años y su implantación en muchos países (China, Corea, Japón, Estados Unidos, etc.) (Judd, 2011). En el caso concreto de España, existen varias instalaciones: San Pedro del Pinatar, Sabadell y Gava con capacidades de 20.000 a 50.000 m³/d, o Alcoy, Arenales y Tamaraceite con capacidades intermedias de 10.000-20.000 m³/d en (Judd, 2011).

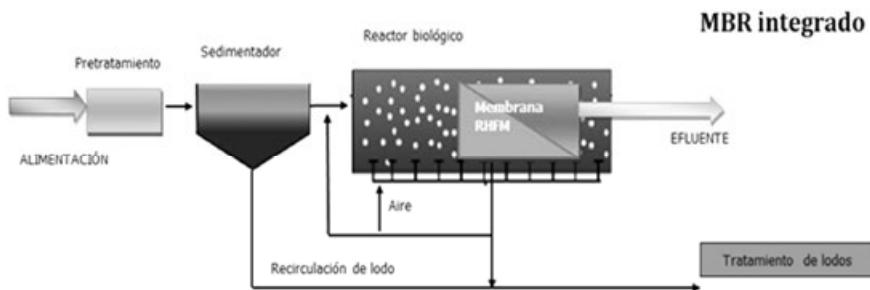


Fig. 7. Esquema de un biorreactores de membranas (MBR) para depuración – regeneración de aguas residuales urbanas.

Su instalación se recomienda en zonas con elevada sensibilidad ambiental, en que las aguas deban ser vertidas con una elevada calidad, o donde sea necesario reutilizar el agua y la disponibilidad de terreno para implantar una instalación de depuración-regeneración sea limitada. También en el caso de que sea preciso desalar el agua antes de su reutilización en riego de cara a evitar problemas de salinización de suelos o deterioro del cultivo, pues su aplicación evita problemas de colmatación de membranas específicas de desalinización: ósmosis inversa o electrodialisis reversible, las empleadas habitualmente.

Además, recientes estudios vinculan los procesos que tienen lugar en los biorreactores de membrana (sorción, biodegradación y retención por la membrana) a la mayor retención observada en estas instalaciones respecto a otras de depuración, de microorganismos patógenos y microcontaminantes orgánicos emergentes (fármacos, compuestos perflorados, hormonas, drogas y productos de cuidado e higiene personal) habituales en las aguas residuales (Ma *et al.*, 2018; Xiao *et al.*, 2019). Estas últimas sustancias se saben que tienen efectos perjudiciales sobre la salud humana e incluso algunos son disruptores endocrinos, por lo que están siendo objeto de seguimientos más exhaustivos tanto en las aguas a reutilizar, como en las estaciones de tratamiento. También la capacidad de los MBRs en relación a depuradoras de carácter convencional como lodos activos, para retener microplásticos procedentes de la rotura o desgaste de objetos plásticos, productos de cuidado personal o lavado de textiles sintéticos, ha sido constatada en recientes trabajos (Talvitie *et al.*, 2017). Por tanto, la calidad de agua regenerada que puede ofrecer un MBR es significativamente mayor que la de otros sistemas de depuración y ocupando para ello, menos terreno.

En todo caso, los costes de implantación y de operación de los MBRs los hace aconsejables para caudales superiores a 1.000 m³/d y para dar servicio a aglomeraciones urbanas de más de 2.000 habitantes equivalentes.

La recuperación de recursos de las aguas en la economía circular

Sabemos que los límites requeridos de calidad del agua regenerada que se utiliza para riego requieren procesos adicionales que encarecen los costes de tratamiento, y es posible que en un futuro próximo una legislación mucho más estricta suponga un incremento notable de estos costes. De hecho, en el mes de febrero de 2019 se ha dado un impulso importante en el Parlamento Europeo a una nueva norma para regular la reutilización que prevé mayores controles en la calidad y en los usos. Esta norma es el resultado de un proceso de reflexión y preocupación en el seno de la Unión Europea, donde los recursos hídricos están bajo una creciente presión que conlleva escasez y deterioro de la calidad. El calentamiento global, los patrones climáticos impredecibles y la sequía están restringiendo la disponibilidad de agua dulce necesaria para el desarrollo urbano y de la agricultura. Por ello, los europarlamentarios consideran que extender el uso de aguas regeneradas, especialmente en la agricultura donde pueden aportar nutrientes valiosos para la agricultura, como el nitrógeno o el fósforo, contribuiría a limitar la extracción de agua. Según la Comisión Europea, la frecuencia e intensidad de las sequías y su impacto económico y medioambiental ha aumentado de manera drástica en los últimos treinta años.

En todo caso, la regeneración llevada a cabo con garantías sanitarias y legislativas, de las aguas residuales, implica un elevado coste económico asociado a la operación de las instalaciones, su seguimiento y control, su mantenimiento, así como a la distribución del agua regenerada.

Por otra parte, la sostenibilidad de las instalaciones de tratamiento de aguas residuales es una cuestión en entredicho que ya ha sido objeto de estudios y de evaluaciones, al tratarse de sistemas que requieren el aporte de energía producida por lo general a partir de combustible fósil que genera gases de efecto invernadero (GEI). Además, el tratamiento de las aguas residuales presenta un balance energético negativo al estar orientado a metabolizar-transformar la materia orgánica presente en las aguas y no a producir energía a partir de esa materia orgánica. Minimizar estos impactos negativos precisa de mejoras en la eficiencia energética de las instalaciones de tratamiento a través de auditorías energéticas, mayores controles de los sistemas y la sustitución de equipos obsoletos. Es también necesario, optimizar el diseño y/o la operación de la planta para reducir la aireación o la adición de productos químicos, reducir el uso de combustible fósil para producir la energía necesaria, minimizar la generación de residuos y permitir el reciclaje de recursos. En este último ámbito, la generación de energía en el sitio, utilizando la carga orgánica de aguas residuales para producir energía (calor y electricidad) puede ser una opción en la que se

está trabajando intensamente. Para ello es crucial concentrar esta materia orgánica, y transformarla por la acción de microorganismos anaerobios, que operan en ausencia de oxígeno, produciendo biogás: una mezcla de dos gases principales: metano, gas combustible y dióxido de carbono (Mo & Zhang, 2013).

Son varios los retos a desarrollar en las instalaciones de tratamiento de aguas residuales del futuro, desde técnicos hasta medioambientales, pero todos ellos se aglutinan en hacer dichas instalaciones lo más flexible posible. Es necesario seguir trabajando en tecnologías y procesos que permitan reutilizar el agua residual para agricultura de una manera más eficiente y a un menor coste, reduciendo la huella de carbono y otros impactos ambientales asociados e intentando aprovechar todo lo aprovechable y maximizando los recursos, o como se conoce hoy en día, bajo el paraguas de la economía circular. En caso de lograrlo las instalaciones de tratamiento de aguas residuales actuales se podrán transformar en instalaciones de recuperación de recursos hídricos (*Water Resources Recovery Facilities-WRRF*) que conviertan las aguas residuales en una fuente de energía, nutrientes y agua recuperada (Viruela *et al.*, 2018).

En lo que respecta a la presencia de nutrientes en las aguas residuales, los riesgos de eutrofización asociados con la descarga de aguas residuales mal depuradas han promovido la implementación de procesos enfocados en las instalaciones de depuración para eliminarlos. Estos nutrientes suelen ser nitrógeno y fósforo en forma de iones de amonio y fosfato. El primero generalmente se elimina mediante separación y mediante el proceso de nitrificación-desnitrificación a través de la combinación de procesos anaerobios, anóxicos y aerobios, mientras que el fosfato se elimina principalmente por precipitación con la adición de productos químicos. En cualquier caso, estos procesos de eliminación implican el uso de energía e instalaciones adicionales y el consumo de productos químicos que pueden contribuir al calentamiento global debido a la emisión de 0,9 kg CO₂/m³ (Hall *et al.*, 2011; Marbelia *et al.*, 2014). Por otro lado, el crecimiento de la población conlleva a un aumento en la demanda de fertilizantes a base de nutrientes destinados a la producción de alimentos, que pueden suministrarse a través de procesos de producción alternativos a los convencionales, en los próximos años (Yan *et al.*, 2018). De hecho, el fosfato es una de las materias primas críticas en el futuro desarrollo de la economía europea, pues no se produce en ningún país de la unión. Por todo ello, la recuperación de nutrientes presentes en las aguas residuales mediante procesos más baratos y eficientes en lugar de su eliminación, se ha convertido en un nuevo objetivo prioritario.

Una vía para recuperar el nitrógeno y el fósforo es su incorporación como estruvita, un compuesto que puede ser utilizado directamente como

fertilizante y que es producido bajo condiciones controladas durante la transformación en ausencia de oxígeno (digestión anaerobia), de la materia orgánica. También es posible aprovechar la capacidad fertilizante de las aguas residuales a través del uso de los lodos, donde se concentran los nutrientes y la materia orgánica a lo largo del proceso de depuración /regeneración y que se ha asociado siempre como un factor negativo del proceso de depuración, pero que actualmente, se puede utilizar para producir un fertilizante bio-estabilizado similar al compost.

En los últimos años, algunos microorganismos como cianobacterias y microalgas han despertado un gran interés por su potencial como vías para recuperar nutrientes de las aguas residuales (Arbib *et al.*, 2012; Beuckels *et al.*, 2015; Whitton *et al.*, 2016). El proceso no requiere la adición de productos químicos y puede reducir los costos de energía. Además, puede proporcionar simultáneamente la eliminación de nutrientes y reducir la huella de carbono, pues estas especies utilizan como fuente de carbono y energía, el dióxido de carbono y producen oxígeno, al igual que hacen las plantas y las masas forestales. El cultivo de microalgas que utilizan aguas residuales en biorreactores es una estrategia sostenible para eliminar contaminantes y producir microalgas para producir posteriormente, productos de alto valor (Mallick, 2002) o para usar como biocombustibles y bioproductos.

En algunos proyectos se ha planteado la producción de plásticos biodegradables, los polihidroxialcanoatos (PHA) son uno de los más prometedores, pues se pueden degradar a agua y dióxido de carbono en condiciones aerobias y a metano bajo condiciones anaerobias por microorganismos presentes en las aguas residuales (Khanna & Srivastava, 2005). Algunas bacterias, arqueas y microalgas sintetizan y acumulan intracelularmente como material de reserva estos bioplásticos, para usarlos posteriormente como fuente de carbono y energía. Estos polímeros, una vez extraídos y purificados presentan propiedades físicas similares a los plásticos derivados del petróleo.

Conclusión

Los conceptos de 'biorrefinería' o instalaciones recuperadoras de recursos en lugar de EDARs o ERARs comienzan a ser cada vez más habituales. Estas instalaciones empiezan a concebirse como industrias en las que se puede regenerar agua, producir energía eléctrica y calor, obtener compost u otros fertilizantes (como la estruvita) para usos agrícolas y productos de valor añadido. Las EDARs pueden convertirse muy pronto en instalaciones, que lejos de ser focos de contaminación y de consumo de energía, sean capaces de autoabastecerse energéticamente y generar

beneficios para la sociedad y el medio ambiente, dadas sus amplias posibilidades (Fig. 8).

Agradecimientos

La autora agradece al Consejo Insular de Aguas de Tenerife, la autorización para incorporar imágenes de las instalaciones gestionadas por dicho organismo al presente capítulo. Asimismo, agradece a BALTEN (Balsas de Tenerife) y a EMMASA (Empresa Mixta de Aguas de Santa Cruz de Tenerife, S. A.), la información aportada; a los miembros del grupo de investigación en “Tratamiento y Reutilización de Aguas” de la Universidad de La Laguna al que pertenece: su apoyo y colaboración para la redacción del presente texto, y por último, al IEHCAN – Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias –, la edición del texto.

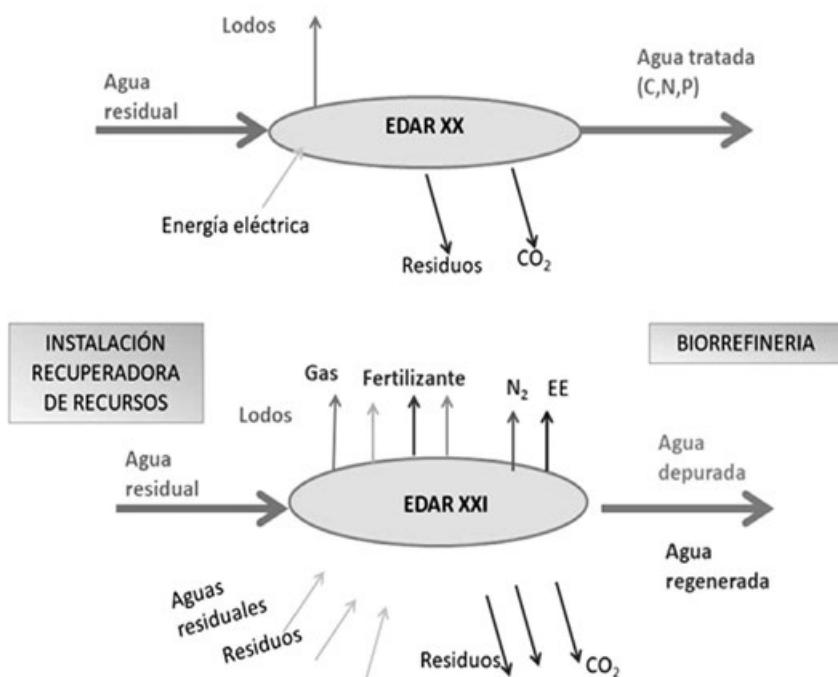


Fig. 8. Esquema ilustrativo de la evolución del concepto de EDAR (ESTACIÓN DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES) entre los siglos XX y XXI (Adaptado de Estévez, 2018).

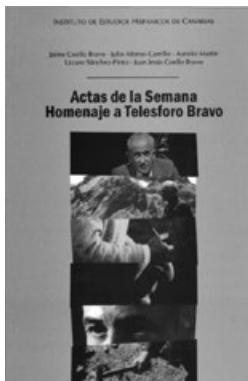
Bibliografía

- ARBIB, Z., J. RUIZ, P. ALVAREZ, C. GARRIDO, J. BARRAGAN & J.A. PERALES (2012). *Chlorella stigmatophora* for urban wastewater nutrient removal and CO₂ abatement. *International Journal of Phytoremediation* 14(7): 714-725.
- BEUCKELS, A., E. SMOLDERS & K. MUYLAERT (2015). Nitrogen availability influences phosphorus removal in microalgae-based wastewater treatment. *Water Research* 77: 98-106.
- CONSEJO INSULAR DE AGUAS DE TENERIFE (1996). Plan Hidrológico de Tenerife. Memoria.
https://aguastenerife.org/index.php?option=com_sppagebuilder&view=page&id=10&Itemid=590 [Consultada el 18/07/2019]
- CONSEJO INSULAR DE AGUAS DE TENERIFE (2018). Plan Hidrológico de Tenerife. Segundo ciclo de planificación hidrológica 2015 – 2021. Memoria.
https://www.aguastenerife.org/index.php?option=com_content&view=article&id=138&Itemid=551 [Consultada el 17/07/2019].
- COTE P., Z. ALAM & J. PENNY (2012). Hollow fiber membrane life in membrane bioreactors (MBR). *Desalination* 288: 145-151.
- DÍAZ, T. (2019). España debe invertir 10.000 millones para depurar las aguas residuales. EL ECONOMISTA. <https://www.eleconomista.es/empresas-finanzas/agua-medioambiente/noticias/9811489/04/19/Espana-debe-invertir-10000-millones-para-depurar-las-aguas-residuales.html> [Consultada el 08/04/2019].
- DIRECTIVA 91/271/CEE DEL CONSEJO, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. DOUE-L-1991-80646.
- 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. DOUE-L-2000-82524.
- ESTÉVEZ, F. (2018). Codigestión a escala real en Sevilla EMASESA presentado en XV Jornadas Técnicas de Saneamiento y Depuración FACSA (Benicassim, Valencia).
- HALL, M.R., J. WEST, B. SHERMAN, J. LANE & D. DE HAAS (2011). Long-term trends and opportunities for managing regional water supply and wastewater greenhouse gas emissions. *Environmental Science Technology* 45(12): 5434-5440.
- HERNÁNDEZ, A. (2015). *Manual de diseño de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales*. Madrid: Garceta.
- IAGUA (2019) <https://www.iagua.es/especiales/depuracion-agua-espana> [Consultada el 16/04/2019].
- IGLESIAS, R., E. ORTEGA, A. MARTÍNEZ, P. SIMÓN, L. MORAGA, J. ROBUSTÉ, E.B. GARCÍA & I. RODRÍGUEZ-RODA (2014). *Guía técnica para la implantación de biorreactores de membrana*. CEDEX. Centro de Publicaciones, Ministerio de Fomento. ISBN: 978-84-7790-548-6; ISSN: 0211-8203.
- INE (Instituto Nacional de Estadística)
<http://www.ine.es/jaxi/Tabla.htm?path=/t26/p067/p01/serie/&file=01005.px>.

- ISTAC (Instituto Canario de Estadística)
<http://www.gobiernodecanarias.org/istac/jaxi-istac/menu.do?uripub=urn:uuid:4c80614c-ee5b-4f77-aab5-564ec7675fe9>.
- JUDD, S. (2011). *The MBR Book. Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment*. Elsevier, Oxford. 2nd edition. ISBN: 978-0-08-096682-3.
- KHANNA, S. & A.K. SRIVASTAVA (2005). Recent advances in microbial polyhydroxyalkanoates. *Process Biochemistry* 40(2): 607-619.
- MA, J., R. DAI, M. CHEN, S.J. KHAN & Z. WANG (2018). Review. Applications of membrane bioreactors for water reclamation: Micropollutant removal, mechanisms and perspectives. *Bioresource Technology* 269: 532-543.
- MALLICK, N. (2002). Biotechnological potential of immobilized algae for wastewater N, P and metal removal: a review. *Biometals* 15: 377-390.
- MARBELIA, L., M.R. BILAD, I. PASSARIS, V. DISCART, D. VANDAMME, A. BEUCKELS, K. MUYLAERT & I.F.J. VANKELECOM (2014). Membrane photobioreactors for integrated microalgae cultivation and nutrient remediation of membrane bioreactors effluent. *Bioresource Technology* 163: 228-235.
- METCALF & EDDY INC. (1995). *Inginería de las aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*. 3^a edición. ISBN: 84-481-1607-0.
- MITECO – MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA (2019). Evaluación de Recursos Hídricos. <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/evaluacion-de-los-recursos-hidricos/> [Consultada el 24/07/2019]
- MO, W. & Q. ZHANG (2013). Energy nutrients water nexus: Integrated resource recovery in municipal wastewater treatment plants. *Journal of Environmental Management* 127: 255-267.
- MONTOYA, F.G., R. BAÑOS, J.E. MEROÑO & F.M. MANZANO-AGUGLIARO (2016). The research of water use in Spain. *Journal of Cleaner Production* 112: 4719-4732.
- ONU (2017). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. *Aguas residuales. El recurso desaprovechado*. ISBN 978-92-3-300058-2. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247647> [Consultado el 02/03/2019]
- PARLAMENTO DE CANARIAS (2016). Consejería de Política Territorial, Sostenibilidad y Seguridad del Gobierno de Canarias - Diario de Sesiones 36/2016, de fecha 24/5/2016 - Punto 27. Comparecencia del Gobierno sobre los emisarios submarinos y conducciones de vertidos.
- REAL DECRETO 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo de la ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas. BOE-A-1996-7159.
- REAL DECRETO 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. BOE-A-2007-21092.
- RIERA, R., F. TUYA, A. SACRAMENTO, E. RAMOS, O. MONTERROSO & M. RODRÍGUEZ (2013). Influencia de la combinación de vertidos de aguas residuales y salmuera sobre la meiofauna. *Ciencias Marinas* 39(1): 15-27.

- RODRÍGUEZ, E. & R.J. VINAGRE (2018). Los retos de la depuración en el siglo XXI. *Tecnoaqua*, 31 (Mayo-Junio), 2-9.
- STEGMANN, J.G. (2017). Depuración en España: La gran asignatura pendiente. ABC https://www.abc.es/natural/vivirenverde/abci-depuracion-espana-gran-asignatura-pendiente-201703151331_noticia.html#vca=mod-sugeridos-p3%E2%80%A6 [Consultada el 31/05/2019].
- TALVITIE, J., A. MIKOLA, A. KOISTINEN & O. SETÄLÄ (2017). Solutions to microplastic pollution removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies. *Water Research* 123: 401-407.
- VIRUELA, A., A. ROBLES, F. DURÁN, M.V. RUANO, R. BARAT, J. FERRER & A. SECO (2018). Performance of an outdoor membrane photobioreactor for resource recovery from anaerobically treated sewage. *Journal of Cleaner Production* 178: 665-674
- WHITTON, R., A. LE MÉVEL, M. PIDOU, F. OMETTO, R. VILLA & B. JEFFERSON (2016). Influence of microalgal N and P composition on wastewater nutrient remediation. *Water Research* 91: 371-378.
- XIAO K., S. LIANG, X. WANG, C. CHEN & X. HUANG (2019). Current state and challenges of full-scale membrane bioreactor applications: A critical review. *Bioresource Technology* 271: 473-481.

Títulos previos de la colección
'Actas Semana Científica Telesforo Bravo'



**Actas de la Semana Homenaje a Telesforo Bravo
(2006) – 147 pp.
[ISBN 84-611-0482-X]**

Jaime Coello Bravo - El hombre que hablaba con las piedras. Una visión de la vida de Telesforo Bravo.

Julio Afonso-Carrillo - Amenazas a la diversidad de plantas marinas por el desarrollo urbano en el litoral: el ejemplo de Puerto de la Cruz.

Aurelio Martín - Aportaciones de D. Telesforo Bravo al conocimiento de la fauna de vertebrados terrestres de las islas Canarias.

Lázaro Sánchez-Pinto - Don Telesforo y la Macaronesia.

Juan Jesús Coello Bravo - Telesforo Bravo y la teoría de los deslizamientos gravitacionales.



**Reflexiones sobre una naturaleza en constante evolución
(2007) – 155 pp.
[ISBN 978-84-61189-571]**

Luis Espinosa García - Recordando a Telesforo Bravo.

Joaquín Araujo - ¿Es compatible turismo y medio ambiente?

Octavio Rodríguez Delgado - El paisaje vegetal de Las Cañadas: su transformación por la intervención humana.

Guillermo Delgado - Colonización y evolución de vertebrados canarios: reptiles, aves y mamíferos.

Eustaquio Villalba - Evolución del conocimiento geológico de Tenerife.



**Naturaleza amenazada por los cambios en el clima
(2008) – 147 pp.
[ISBN 978-84-61264-568]**

Emilio González Reimers - Paleodieta y paleonutrición.

Antonio Machado Carrillo - Estudiando a los chascones, récord de biodiversidad en Canarias.

Marta Sansón - Arrecifes y manglares: ecosistemas en la frontera entre la tierra y el mar.

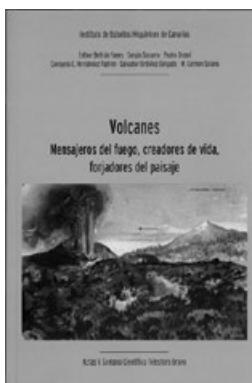
Marcelino del Arco Aguilar - La flora y la vegetación canaria ante el cambio climático actual.

Alberto Brito - Influencia del calentamiento global sobre la biodiversidad marina de las islas Canarias.



Misterios de la Gea. Descifrando los enigmas ocultos en rocas, gases, agua y fuego (2009) – 172 pp. [ISBN 978-84-613-4817-6]

Francisco Anguita - Marte y la Tierra: historia de dos planetas.
Edelmira Luis Brito - Los recursos hídricos de La Caldera de Taburiente.
Antonio Eff-Darwich - Tenerife bajo las leyes de la física.
Esther Martín González - El legado paleontológico de nuestras islas: un patrimonio a conservar.
Nemesio M. Pérez - Emisiones difusas, dispersas y silenciosas de dióxido de carbono en los volcanes.



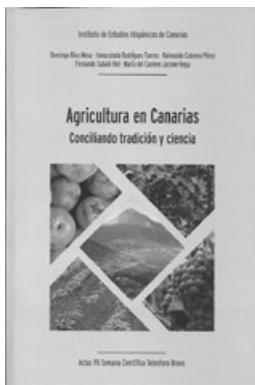
Volcanes. Mensajeros del fuego, creadores de vida, forjadores del paisaje (2010) – 156 pp. [ISBN 978-84-614-3579-1]

Esther Beltrán Yanes - Conviviendo con volcanes en el Valle de Santiago: el paisaje de la comarca de Santiago del Teide antes de la erupción del Chinyero en 1909.
Segio Socorro - Cavidades volcánicas de Canarias. Tipos y génesis.
Pedro Oromí - La fauna subterránea de Canarias: un viaje desde las lavas hasta las cuevas.
Consuelo E. Hernández Padrón - El desconocido y sorprendente mundo de los líquenes que pueblan las lavas.
Salvador Ordóñez Delgado - Estudio de la erupción del Chinyero por Lucas Fernández Navarro, una investigación vulcanológica pionera.
M. Carmen Solana - Peligros asociados a las erupciones de Tenerife, su impacto y reducción en caso de erupción futura.



Biodiversidad. Explorando la red vital de la que formamos parte (2011) – 190 pp. [ISBN 978-84-615-3089-2]

José María Landeira - Plancton: un universo marino diverso y desconocido.
Esperanza Beltrán Tejera - Los hongos: notables protagonistas en la biodiversidad canaria.
Leopoldo Moro, Juan José Bacallado y Jesús Ortea - Babosas marinas de las islas Canarias.
Wolfram Wildpret de la Torre - Reflexiones sobre la biodiversidad canaria en el año internacional de la biodiversidad.
Javier Reyes - Sebadales: explosión de biodiversidad en desiertos de arena submarinos.



Agricultura en Canarias. Conciliando tradición y ciencia (2012) – 174 pp.

[ISBN 978-84-616-0641-2]

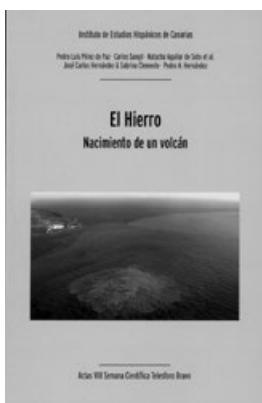
Domingo Ríos Mesa – Las papas antiguas de Canarias: origen y diversidad.

Immaculada Rodríguez Torres – Patrimonio vitícola de Canarias.

Raimundo Cabrera Pérez – Control de plagas agrícolas: una historia de ida y vuelta.

Fernando Sabaté Bel – Recuerdos del futuro: la experiencia vernácula y la sostenibilidad.

María del Carmen Jaizme-Vega – La vida en el suelo. Papel de los microorganismos en la agroecología.



El Hierro. Nacimiento de un volcán (2013) – 179 pp.

[ISBN 978-84-616-5651-6]

Pedro Luis Pérez de Paz – El Hierro: volcán de naturaleza y melancolía.

Carlos Sangil – Cambios en la biodiversidad vegetal submarina del Mar de Las Calmas tras la erupción volcánica de La Restinga: una oportunidad para profundizar en el conocimiento de los ecosistemas marinos de Canarias.

Natacha Aguilar Soto, Mark Jonson, Patricia Arranz, Alejandro Escámez, Cristina Reyes, Agustina Schiavi, Meter Madsen y Alberto Brito – Volcanes, zíofos y otros valores naturales de las aguas profundas de El Hierro.

José Carlos Hernández y Sabrina Clemente – Reservas marinas, cambio climático y catástrofes naturales: el caso del Mar de Las Calmas en la isla de El Hierro.

Pedro A. Hernández – La erupción volcánica de El Hierro: la importancia de vigilar los volcanes.



Cien años de Don Tele. Celebrando y recordando al sabio y la persona (2014) – 157 pp.

[ISBN 978-84-617-1648-7]

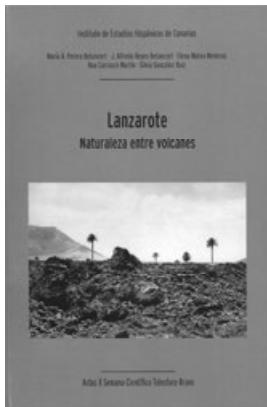
Matilde Arnay de la Rosa – Las observaciones arqueológicas de un naturalista.

Antonio Galindo Brito – Metabolitos secundarios y defensas de las plantas.

Marcos Báez Fumero – Un paseo por los Parques Nacionales del mundo.

Isidoro Sánchez García – Telesforo Bravo, maestro de la convivencia.

Francisco Javier Coello Bravo – Telesforo Bravo, una vida a la búsqueda del agua.



**Lanzarote. Naturaleza entre volcanes (2015) – 185 pp.
[ISBN 978-84-608-1557-0]**

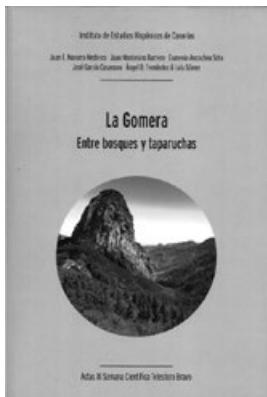
María Antonia Perera Betancort – Arqueología de Lanzarote. Particularidades insulares.

J. Alfredo Reyes Betancort – Las hijas de Lanzarote. Un paseo por su flora endémica.

Elena Mateo Mederos – La gestión del Patrimonio Geológico de Lanzarote.

Ana Carrasco Martín – Lanzarote, Reserva de la Biosfera: veintidós años de trayectoria y cambio de fase.

Silvia González Ruiz – El mar y los recursos marinos del Archipiélago Chinijo.



**La Gomera. Entre bosques y taparuchas (2016) – 240 pp.
[ISBN 978-84-617-4752-8]**

Juan Francisco Navarro Mederos – Arqueología en La Gomera: lo que va de ayer a hoy.

Juan Montesino Barrera – Los paisajes y la gente de La Gomera.

Eumenio Ancochea Soto – Evolución geológica de la isla de La Gomera.

José García Casanova – Tesoros botánicos de La Gomera.

Ángel B. Fernández y Luis Gómez – Qué son los bosques antiguos de laurisilva. Su valor y situación en Canarias.



**Investigando el mar. Viaje al planeta agua (2017) – 202 pp.
[ISBN 978-84-697-6097-0]**

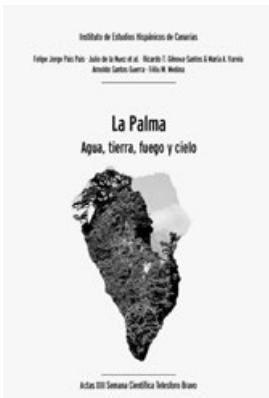
Inés Galindo, Carmen Romero, Miguel Llorente, Juan C. Rubio, Juana Vegas, Nieves Sánchez y Gonzalo A. Díaz – Resultados preliminares del inventario de lugares de interés geológico submarinos del Geoparque Mundial UNESCO de Lanzarote y Archipiélago Chinijo.

Eladio Santaella Álvarez – La acuicultura en Canarias: situación y perspectivas. La acuicultura de túnidos.

Pablo Martín-Sosa – La pesca artesanal y la conservación de la biodiversidad: avances en la gestión integrada de la pesca y el medio ambiente en el mar de Canarias.

Ramiro Martel Reyes – El buceo en el Valle de La Orotava.

Francis Pérez – Una vuelta al mundo bajo el agua.



**La Palma. Agua, tierra, fuego y cielo (2018) – 193 pp.
[ISBN 978-84-09-04922-6]**

Felipe Jorge País País – El uso del agua entre los benahoaritas.

Julio De la Nuez Pestana, Ramón Casillas Ruiz, Juan R. Colmenero Navarro, Carlos Fernández Rodríguez, Réka Lukács, Szabolcs Harangi y Fred Jourdan – La Palma: desde las entrañas hasta la piel de un volcán.

Ricardo Tanausú Génova Santos y María Antonia Varela – El cielo de Canarias: una ventana al Universo.

Arnoldo Santos Guerra – Singularidades florísticas de la isla de La Palma.

Félix Manuel Medina – Fauna vertebrada de la isla de La Palma: estado de conservación y gestión.

