

Durante la celebración del Symposium estuvieron expuestas varias colecciones y exposiciones a destacar, además de la aportada por el Museo de la Naturaleza y el Hombre, como la de especies marinas cedidas por el INDP (Instituto Nacional das Pescas), la colección privada y de interés mundial de un aficionado caboverdiano a la malacología, la exposición de sellos de colecciones de Fauna y Flora, y ciertas muestras de artesanía local.

Volviendo a las jornadas en sí, tras los intensos cuatro días de conferencias, en que se expusieron los trabajos orales en los idiomas oficiales (inglés y portugués) y se explicaron los resultados mostrados en los pósters por los distintos autores, podemos destacar una serie de conclusiones finales extraídas de este cuarto Symposium:

- el balance enormemente positivo del mismo, no sólo por haberse cumplido con el principal objetivo de este tipo de encuentros, que constituye la puesta en común de trabajos de interés para los archipiélagos;

- la divulgación de los proyectos que se estaban realizando en ese momento y/o estaban en vías de realizarse;

- el suscitar el debate sobre ciertas especies vulnerables sobre las que se deberían tomar medidas para contribuir a su conservación;

- y, sobre todo, se activó la ya sabida necesidad de colaboración entre las instituciones de las distintas regiones sobre temas comunes, lográndose llegar a acuerdos que permitirán una estrecha colaboración en lo que respecta a los estudios de investigación atlánticos.

Así, fruto de ello son las colaboraciones logradas entre:

- ISECMAR y el Herbario Nacional de Holanda, con el profesor William Prud'Homme al frente, para la participación conjunta en los estudios en materia de macroalgas de interés industrial;

- INIDA y Universidad do Algarve, a raíz de los estudios realizados sobre los tajinastes (*Echium* spp.) de Cabo Verde por la doctora Maria Romeiras, que propició la futura colaboración entre ambos.

Como es habitual en este tipo de encuentros, antes del acto de clausura se procedió a la selección de la sede del próximo "V Symposium en Fauna y Flora de las Islas Atlánticas", resultando electa la candidatura de Irlanda, con el profesor Declain Murray, de la Universidad de Dublín al frente.

Finalmente, tuvo lugar una cena de clausura como despedida del encuentro, con animada participación y el habitual intercambio de contactos. Y no podía faltar una visita al lugar quizás con más arraigo para la población caboverdiana: la discoteca, para disfrutar de una última demostración de su baile...

Ya sólo cabe reseñar a aquellos que faltaron a esta última cita por encontrar dificultades para llegar al archipiélago, debido principalmente a los consabidos problemas de transporte. Para ellos, nuestras más sinceras disculpas desde la Organización.

Por último, sólo me resta recomendarles que no se pierdan el próximo, a celebrar en Dublín, que después de lo visto, promete. ●

HIDRO GEOLOGÍA DE LAS ISLAS OCEÁNICAS

Carlos Soler Licerias

(Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos)

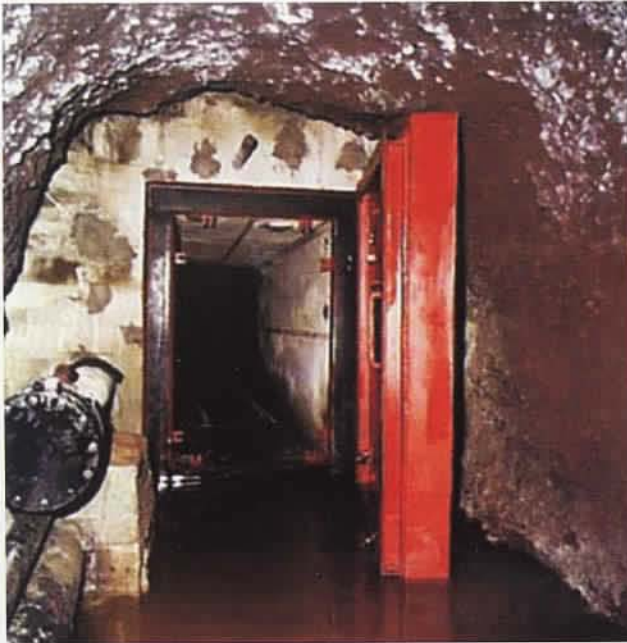
Fotos: C. Soler.

Las ciencias que estudian el agua son la hidráulica y la hidrología. Esta última abarca a la hidrogeología, que es la parte que estudia el agua subterránea. El inicio de estas ciencias se podría atribuir al sabio rey Salomón, cuando un día, hace ya 3.200 años, reuniendo a toda su corte y contemplando desde lo alto el Mar Muerto, preguntó: ¿cómo es posible que el río Jordán vierta continuamente sus aguas sobre el mar y éste no suba de nivel? Nadie pudo responder. La humanidad tardó 1.300 años en averiguar la respuesta. Ésta vino de la mano de un romano, un funcionario del Imperio, Marco Vitrubio Polión, ingeniero y arquitecto, contemporáneo de Jesucristo, que escribió un tratado sobre construcciones y que, en su libro 8º, dedicado al agua, apunta por primera vez alguna idea sobre el ciclo hidrológico. Muchos otros sabios han dedicado su tiempo y conocimientos al agua subterránea,

entre ellos cabe citar a Tales de Mileto, Aristóteles, Arquímedes, Fracastorius, Leonardo da Vinci, Hadley, Pallisy, Halley, los Bernouilli, Darcy y tantos otros hasta llegar a nuestros días e incluso muchos más que están por nacer, porque lejos está de darse por acabada.

La formulación matemática de esta ciencia comenzó a principios del siglo XX y fue desarrollada para terrenos continentales. De esta forma, los hidrogeólogos continentales toman datos de sondeos y los aplican a formulas que les permiten imaginar cómo es el acuífero y cómo fluctúa el nivel piezométrico.

En Canarias la situación es totalmente diferente. Un archipiélago formado por siete islas con demandas, usos e hidrogeología distintas, suponen siete continentes en miniatura donde poder observar cómo se ha resuelto el problema del agua. Además, por



Cierre estanco en una galería aprovechando la existencia de un dique intrusivo de 6 metros de anchura. Este sistema de cierre en las galerías regula las aportaciones de caudal, evitando el despilfarro que supone un drenaje abierto. Cuando se cierra la compuerta, el caudal se emplea en rellenar los huecos del acuífero previamente drenados. De esta forma, el acuífero se convierte en un embalse de regulación del que sólo se extraen recursos y el caudal necesario en cada momento.

razones que luego veremos, el canario ha perforado más de 6.000 pozos de 3 metros de diámetro y centenares de metros de profundidad y 2.000 galerías o pequeños túneles hidráulicos de 1'5 x 1'8 m de sección. Todavía cabe citar otra obra hidráulica híbrida entre estas dos: el pozo-galería, un pozo canario con galería de fondo.

Estos 8.000 puntos de captación de aguas son a la vez otros tantos puntos de observación de la hidrogeología de las islas Canarias; la gran mayoría permiten entrar en el subsuelo y ver las condiciones del acuífero. Por esta razón el hidrogeólogo canario no necesita imaginarse dónde está el nivel freático o cómo evoluciona con el tiempo, solo tiene que entrar y verlo con sus propios ojos.

Estos 8.000 puntos de control de los acuíferos insulares, que suponen una media de captación de 1 por km², constituyen una red de control y de conocimientos único en el mundo, y convierten al archipiélago en una escuela de hidrogeología volcánica. Desgraciadamente, todo esto sigue sin ser valorado en su justa medida por todos aquellos que se dedican a buscar agua en las islas oceánicas. El archipiélago canario aporta a la ciencia siete formas diferentes de solucionar el abastecimiento de aguas, unas con mayor dependencia del exterior que otras, unas más y otras menos sostenibles, pero en cualquier caso todas ellas son soluciones posibles.

Los pozos y las galerías de Canarias atestiguan que en pocos lugares del mundo se ha buscado agua con tanto afán como aquí. Este archipiélago es parco en lluvias, muy inferior a la media de la península Ibérica y, si exceptuamos Cabo Verde, todas las demás islas que salpican éste y cualquier otro océano, tienen una pluviometría muy superior a la canaria. Por eso todavía extraña más que el canario siempre se haya decantado por economías que se caracterizan por los elevados consumos de agua: nada más producirse la conquista por los españoles durante el siglo XV se plantó caña de azúcar, ante la competencia del Caribe y durante el siglo XIX se cambió el cultivo a la platanera y ahora, a comienzos del siglo XXI, asistimos a la implantación del turismo; tres "cultivos" devoradores de grandes cantidades de agua.

Pero también es cierto que en ningún sitio se han conseguido éxitos tan espectaculares como los aquí logrados. En La Palma y hasta comienzos del siglo XX se abastecían con 15 hm³/año que aportaban los nacientes y los cauces de los barrancos; después de perforar 69 pozos y 170 galerías se ha logrado multiplicar por cinco este volumen anual. En Tenerife este éxito ha sido todavía más espectacular, ya que de 21 hm³/año se ha llegado a obtener 225 hm³/año y todos ellos extraídos del subsuelo. Toda esta lucha ha convertido al canario en uno de los mejores ingenieros hidráulicos, cuyos conocimientos los ha adquirido debajo de la tierra, en su afanosa búsqueda para arrancarle a las rocas del acuífero el agua que destilan. El legado que nos ha quedado, como ya se ha dicho, es la mejor escuela de hidrogeología volcánica del mundo; los pozos y las galerías son los mejores libros donde se puede estudiar todo aquello que hay que hacer, e incluso lo que hay que evitar, para captar el agua subterránea.

La geología volcánica se caracteriza por su elevado grado de heterogeneidad, que llega hasta el punto de apreciarse materiales diferentes en los dos hastiales (paredes laterales) de algunos tramos de ciertas galerías. Además de estas variaciones litológicas que influyen directamente sobre los parámetros hidrogeológicos, también hay que considerar la existencia de barreras impermeables de súbita aparición, de las cuales tan solo en algunos casos es posible la pre-

dicción de su existencia, pero sin seguridad acerca de su comportamiento; tal es el caso de los diques, intrusiones filonianas muchas veces basálticas, que a modo de pantallas pueden constituirse como un verdadero obstáculo para la circulación del agua subterránea. En estos casos, el agua se ve obligada a acumularse hasta lograr una altura suficiente por detrás del dique con el que lograr pasar el caudal y continuar su camino hacia el mar. A menudo estos diques se presentan en familias con direcciones sensiblemente paralelas, lo que llevó a pensar, durante la década pasada, en que bajo el subsuelo se producía una canalización de caudales que conducía las aguas en direcciones de flujo concretas y coincidentes con las direcciones de las familias de diques. Las perforaciones de sondeos en La Gomera y sus ensayos de bombeo, junto con la técnica de cierres con hormigón armado, han evidenciado que las familias de diques no sólo canalizan el flujo en una dirección, sino que su efecto es una sobreelevación del nivel freático. En estas zonas de diques, y gracias a la intersección entre ellos -puesto que es imposible que todos sean paralelos-, el acuífero se asemeja a un panal de abejas en el



Final de la galería de fondo del pozo "Los Padrones" (valle de El Golfo, El Hierro). Tramo perforado dentro del acuífero, donde las aportaciones surgen del fondo, hastiales y techo.

que cada celdilla es un compartimento delimitado por la intersección de tres o más diques, con un nivel piezométrico propio, pero que depende hidráulicamente de los niveles de las celdillas próximas. Esta sobre-elevación del acuífero provocada por las mallas de diques origina dos beneficios añadidos: una mayor altura del nivel freático y un mayor volumen de reservas. Ambos factores explican las elevadas cotas de las galerías de La Palma y su curva de descenso y posterior estabilización de caudales.

La heterogeneidad geológica y la existencia de niveles o pantallas de baja o nula permeabilidad hacen que sea muy difícil, por no decir imposible, predecir el comportamiento hidrogeológico con el empleo de una fórmula. Valores tales como esa misma permeabilidad, la transmisivi-

dad o el índice de huecos obtenidos mediante un ensayo de bombeo en un pozo, no pueden ser extrapolables al pozo contiguo aún estando en la misma serie geológica. De ahí que la hidrogeología volcánica debe ser considerada más como un ARTE que como una CIENCIA. Esto no significa que no se le pueda exigir precisión, pues ésta la puede aportar cuando ese arte es capaz de definir los dos parámetros fundamentales: situación y circulación del agua subterránea. Además de éstos, el balance hidráulico y la hidroquímica nos aportan otro dato fundamental: cuánta agua se puede extraer de calidad asequible para nuestras necesidades. Para ambos datos es importante la antigüedad y naturaleza de los materiales que forman el subsuelo, porque ellos nos definirán su permeabilidad: factor clave para la infiltración o la escorrentía y para aguas poco o muy mineralizadas.



Dique atravesando materiales freatomagmáticos.

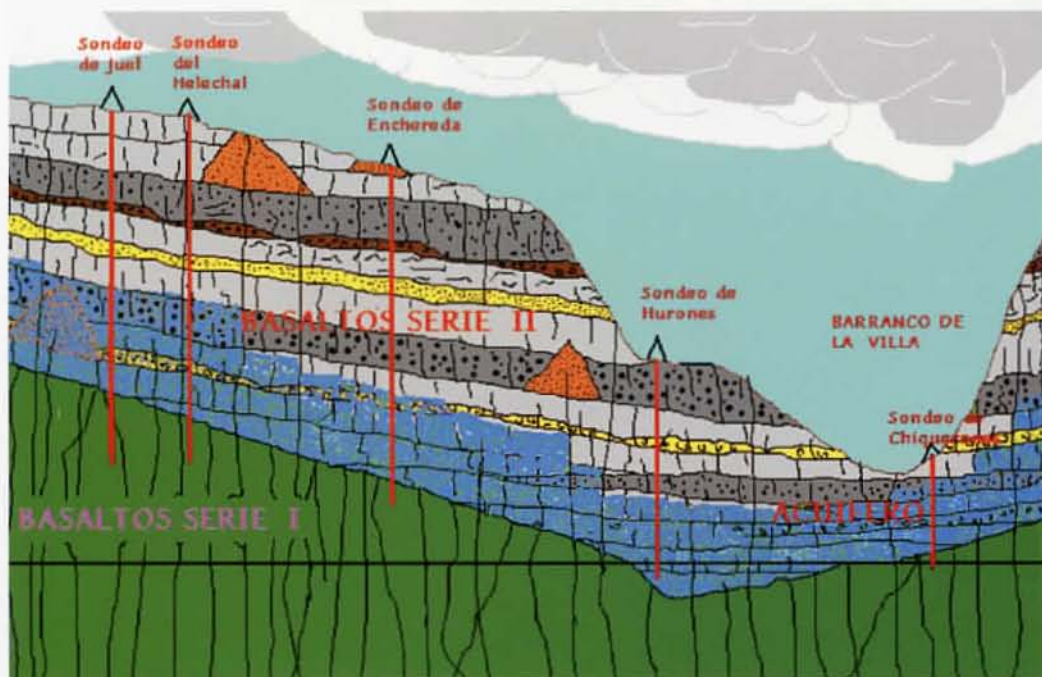


Maquinaria de perforación para la ejecución de galerías.

Los terrenos jóvenes o zonas de actividad volcánica remanente o residual, son ricos en emanaciones de gases volcánicos, principalmente dióxido de carbono, cloro y azufre. Cuando estos gases atraviesan el acuífero provocan, con su disolución en el agua, la formación de ácidos carbónico, clorhídrico y sulfúrico, que atacan a la roca por donde circulan. A diferencia de los terrenos sedimentarios, en general ricos en calcio, los volcánicos lo son en sodio, y por esta razón los ácidos disocian los minerales en sustancias solubles tales como bicarbonatos de sodio y calcio, cloruros y sulfatos. Estos son los iones que se encuentran en los acuíferos contaminados por gases volcánicos y en algunos casos en tal cantidad que invalidan a esas aguas para cualquier tipo de uso.

En algunas islas como Tenerife, la contaminación volcánica es capaz de inutilizar acuíferos altos como los de Icod y La Guancha. Otras veces contaminan la mitad sur de una isla, como sucede en La Palma, donde las aguas de la Fuente Santa están tan salinizadas que las convierten en prodigiosas. Por último, en las islas jóvenes, puede alcanzar extensiones tan grandes como el del 80% del acuífero insular; tal es el caso de El Hierro, la más pequeña y joven de las Afortunadas, y también el de islas del Pacífico como Isabela y Fernandina en Galápagos.

La situación y la circulación del agua subterránea tiene también mucho que ver con el proceso de formación de la isla y con su antigüedad. Fruto de estas variables, es la posible



Perfil hidrogeológico del cauce y margen izquierda del barranco de la Villa (La Gomera), con indicación del acuífero y los sondeos que actualmente suministran el abasto a San Sebastián, Hermigua y Agulo.

existencia de un zócalo impermeable, formación geológica tal que su permeabilidad es prácticamente nula. Muchos pueden ser los candidatos a zócalo impermeable, el principal es sin duda el complejo basal, ya que su antigüedad, alteración y compactación le confieren esa primacía. Generalmente está recubierto por coladas antiguas, pero en ocasiones la

erosión lo ha hecho aflorar: esto sucede en la isla de Santiago, en Cabo Verde, y en Fuerteventura, La Gomera y La Palma. Pero también hay otros zócalos impermeables, esos basaltos antiguos que recubren el complejo basal, los cuales pueden ser suficientemente antiguos y estar tan alterados que resulta difícil, y a veces imposible, distinguir lo

PERFIL CON LA SITUACION REAL DEL ACUIFERO



Perfil hidrogeológico de Tenerife entre Bajamar y Santa Cruz, donde se indican los sondeos perforados dentro del túnel de Tabares, que suministra agua a Santa Cruz de Tenerife.

que en su día fue una colada masiva de una capa de piroclastos. Así ocurre con las Series Antiguas en la parte norte de La Gomera y en Fuerteventura.

También hay que mencionar como zócalo impermeable al mortalón, nombre con el que se conoce en Canarias a un “debris avalanche” de dimensiones verdaderamente espectaculares: trescientos metros de potencia en Güímar y dos kilómetros en el valle de Aridane. Estas proporciones guardan justa correspondencia con el proceso de gestación: el mortalón son los residuos de gigantescos deslizamientos donde volúmenes de centenares de km³ (en El Golfo, La Orotava, Güímar, Icod y El Paso) han sido capaces de hacer desaparecer un tercio de la isla, arrastrando en su caída

una montaña de 2.000 metros de altura. Así fue lo que sucedió en El Hierro hace ahora poco más de 10.000 años. Las repercusiones hidrogeológicas de estos enormes deslizamientos no se limitan sólo a la formación de los mortalones, puesto que a menudo son los responsables de cambios en la posición, la circulación e incluso hasta en el quimismo de las aguas del acuífero.

Otras veces sucede que el mortalón no es ciertamente un zócalo impermeable, sino que aún siendo impermeable confina otro acuífero bajo él. Así sucede en La Orotava, donde un sondeo vertical se encontró con ese acuífero confinado bajo el mortalón. También ocurre que el mortalón ofrece zonas de permeabilidad diferente. Esto obedece a un distinto proceso de colmatación. En principio, un “debris”,



Corte hidrogeológico del barranco y laderas de Valle Gran Rey, donde se indica la posición del acuífero gracias al pozo de El Altito y al sondeo horizontal de investigación. Esta disposición del acuífero ha permitido cambiar la obra de perforación inicial de una galería de fondo en el pozo, por una galería emboquillada en superficie y a la cota del brocal del pozo. Una mayor simplicidad de ejecución, un ahorro económico en la obra y en la extracción del agua y, sobre todo, una mayor seguridad de los trabajadores, amparan el cambio propuesto.



Depósito de regulación y estación de bombeo de "Los Roquillos" (El Hierro), mimetizados bajo la forma de una casa herreña. Esta red de transporte eleva 50 l/s a 750 metros de altura mediante tres impulsiones, y con ello se consigue el abasto urbano a toda la isla de El Hierro. El pozo que se observa en primer término permite la salida de la tubería que salva el acantilado del valle de El Golfo.

cuando se forma, es un aglomerado de granulometría caótica, pero si se mira con detalle, se aprecia que dentro del caos, quiere surgir el orden: las zonas más alejadas de la cabecera del deslizamiento tienen mayor proporción de fiños; por el contrario, y en cabecera, los bloques fracturados y basculados predominan más que las arenas y gravas que rellenan huecos. Los más pequeños se colmatan más rápidamente que los grandes, y por eso las zonas alejadas de cabecera tienen una menor permeabilidad, mientras que los de cabecera pueden ser capaces de aportar un inusual volumen de huecos, como así se ha producido en el frente actual del túnel de trasvase en La Palma. En resumen, si el mortalón no es tan antiguo como para ser totalmente impermeable, pueden existir zonas en él, tales como los grandes bloques que forman la cabecera, cuyos huecos permiten un aporte de agua en forma de grandes volúmenes de reserva.

La situación y la circulación del agua subterránea también dependen del proceso de formación de la isla. Éste siempre empieza

con una elevación de la corteza oceánica, que a modo de abombamiento comienza a levantarse desde el fondo del océano. Poco a poco esta protuberancia aumenta hasta que supera el límite elástico de la corteza, partiendo en un punto o a lo largo de una dirección o en una conjugación de ambos: punto y direcciones de fractura. En cualquier caso, por esas zonas de fractura comienza un proceso de erupciones volcánicas submarinas que, apilándose unas sobre otras, irán haciendo crecer el abombamiento a la vez que sigue ascendiendo. De esta forma, con elevaciones y erupciones, se logra que un día surja una isla donde antes no había más que océano.

Spongamos que tenemos ahora una de estas islas recién creadas, formada por el apilamiento de coladas emitidas desde un punto central. Desde lejos la silueta de una isla así recuerda la forma de un sombrero chino, como Santa Cruz y Fernandina en Galápagos o Saba en el Caribe. En islas jóvenes como éstas, en las que la superficie emergida ha

sido ganada al mar por las coladas, el acuífero está supeditado a la conexión hidráulica con el agua del mar, que también se infiltra por la costa hacia el interior de la isla. El agua dulce del subsuelo, procedente de la infiltración del agua de lluvia, al tener menor contenido en sales, flota sobre el agua salada subterránea. El equilibrio físico-químico que provoca esta flotabilidad hace que el acuífero adopte la forma de una lenteja pero con la mitad inferior mucho más abultada que la superior. Según la fórmula de Ghyben-Herzberg, por cada metro de agua dulce que se sitúa en el acuífero por encima del nivel del mar, hay unos 40 metros de acuífero por debajo, antes de llegar al contacto agua dulce-agua salada. La realidad todavía es más exagerada, puesto que esta relación de 40 a 1 se transforma en

120 a 1 en cuanto pensemos que el agua del acuífero aumenta de salinidad a medida que descendemos, en vez de mantenerse pura. De hecho, esta graduación de salinidad en el interior de los acuíferos volcánicos hace que la circulación del agua de recarga, la que anualmente se infiltra, se mueva en su mayor parte por la zona superficial del acuífero y se descargue en el mar bajo la clara influencia de la marea. En islas como las Canarias, donde la carrera de marea hace oscilar el nivel del mar 2,50 metros, la descarga del acuífero se realiza por la orilla y prácticamente en marea baja. En esos momentos, conocidos por los grandes pueblos marineros, como fueron los fenicios y los españoles, es cuando se hacían las aguadas y es también el origen de los nombres de playas dulces y playa del

agua que salpican las costas de todos los archipiélagos. En San Barthélémy, Caribe, se han llegado a medir 300 l/seg. en l'Anse de Gouverneur y 500 l/seg en Isabela, Galápagos, siempre en marea baja y como descarga del acuífero. En la Palma, desde Barlovento a Garafía, esta descarga mareal es un verdadero espectáculo que la naturaleza repite dos veces al día y que le gustaba relatar a D. Telesforo Bravo.

Otro caso de situación y circulación de las aguas subterráneas en islas oceánicas es cuando este zócalo



Galería que muestra el agua de repisa y los prismas de retracción del basalto.

impermeable se sitúa muy por encima del nivel del mar. Éste sería el ejemplo que podemos ver en las islas de Fuerteventura, La Gomera y La Palma, y también en Tenerife y Gran Canaria. En este caso el acuífero se sitúa a cotas muy altas, puesto que está obligado a circular por encima de este zócalo. El paleorrelieve de este zócalo no sólo eleva el acuífero, sino que también

va a determinar la circulación del agua subterránea. En La Gomera el zócalo está formado por el complejo basal y por la Serie Antigua I; ambas presentan una mayor altura en el norte que en el sur, con lo que provocan que el agua de infiltración circule hacia el sur. En La Palma el zócalo está formado por el complejo basal, que adopta la forma de una “isla” cónica enterrada y

centrada bajo la mitad norte de la isla. La máxima cota actual de la cúspide sepultada es 1.600 m (afloramiento de los Cantos de Turugumay), por lo que obliga a que el acuífero se sitúe por encima de esta cota hasta el nivel del mar. Si la hidrogeología de La Palma sólo dependiera de la posición de este zócalo, el agua del acuífero se situaría por encima y desde allí resbalaría por la superficie de esta isla sepultada hasta llegar al mar. En este caso los paleobarrancos canalizarían los grandes caudales, pero hay otros factores que también condicionan la circulación del agua subterránea y minimizan los efectos del paleorrelieve del zócalo impermeable. Estos factores son los diques que, sobreelevando los niveles freáticos, suavizan las irregularidades de esa isla sepultada. A su vez le confieren una altura todavía mayor al acuífero y permiten, como sucede en La Palma, concebir una solución a partir de una galería que abastezca por gravedad a toda la isla. ●



Edificio del pozo “Los Padrones” (valle de El Golfo, El Hierro), mostrando la salida de agua por gravedad, lo que le otorga el título de único “pozo artesiano” de Canarias y merecedor por ello del Premio Agustín de Bethencourt a la mejor Obra Civil.