

3. ASPECTOS GEOLÓGICOS E HIDROGEOLÓGICOS DE LAS AGUAS MINERALES EN ESPAÑA:

3.1. Concepto de aguas minerales

3.2. Condiciones geológicas de las aguas minerales en España

3.2.1. Introducción

3.2.2. Rasgos geológicos principales de la España peninsular e insular

3.2.3. Relaciones entre las características geológicas y las aguas minerales

3.3. Hidrogeología y geoquímica de las aguas minerales

3 Aspectos geológicos e hidrogeológicos de las aguas minerales en España

Juana Baeza Rodríguez-Caro (3.1)

Juan José Durán Valsero (3.2)

José Antonio Cuchí Oterino (3.3)

3.1. Concepto de aguas minerales

Las aguas minerales en España son de composición físico-químicas variada, en general con alto contenido en sales minerales o gases disueltos, aunque pueden existir aguas de mineralización muy débil. El contenido en componentes mayoritarios o aquellos que caractericen al agua debe ser estable a lo largo del tiempo para ser consideradas como tales.

En la legislación española no se define de una forma genérica qué es un agua mineral, pero sí los distintos tipos contemplados en la normativa vigente. Se puede deducir según las clasificaciones que se efectúan, que son aquellas aguas subterráneas que por sus características físico-químicas puedan incluirse en las definidas por la Ley de Minas y la Reglamentación Técnico Sanitaria para la elaboración, circulación y comercio de aguas de bebida envasada. Aunque quizás fuese más acertado indicar que las aguas minerales son aquellas aguas subterráneas de circulación profunda y, en consecuencia, aunque no necesariamente, con gran tiempo de residencia en el acuífero, y con unas características físicas o químicas que las diferencian del resto. El tiempo de residencia en el acuífero, la profundidad de donde proceden y el gradiente geotérmico dan lugar a que se mineralicen y, en algunos casos, a que sean termales.

Para que un agua subterránea pueda ser considerada como termal, su temperatura debe ser superior a un valor mínimo convencional, absoluto o relativo, generalmente ligado a la temperatura media de las aguas subterráneas de la región o a la temperatura media anual del aire en la zona. En la legislación española (Ley 22/197, de 21 de julio, de Minas) se consideran aguas termales aquellas que

alcanzan una temperatura 4°C superior a la temperatura media anual del ambiente, medida ésta en el lugar donde se alumbran.

Por otro lado, se denomina agua minero-industrial a aquella cuyo contenido en sales minerales o gases disueltos la hacen adecuada para el aprovechamiento industrial de dichas sustancias. Del mismo modo, las minero-medicinales son las que por su contenido en sales o gases presentan propiedades terapéuticas y son utilizadas con este fin. Por último, están las aguas de bebida envasada (aguas minerales naturales y de manantial), que para ser consideradas como tales, deben cumplir los requisitos exigidos en el R.D. 1164/1991 de 22 de Julio.

3.2. Condiciones geológicas de las aguas minerales en España

3.2.1. Introducción

Las aguas minerales, entendiendo por tales las aguas subterráneas con unas características físico-químicas diferenciales (grado y tipo de mineralización, temperatura) de la mayor parte de las aguas subterráneas, están estrechamente condicionadas por las propiedades geológicas de los materiales que atraviesan, en los que se almacenan, y a través de los cuáles alcanzan la superficie. En el caso de España, existe una gran variedad de aguas minerales, con una dependencia a grandes rasgos del dominio geológico en que éstas se encuentran. A continuación se describen las características más importantes de cada una de las grandes unidades geológicas del territorio español, para posteriormente pasar revista a los tipos de aguas minerales presentes en cada una de ellas.



La presencia de yesos y sales en los materiales triásicos, muy abundantes en España, provoca la existencia de fuentes con aguas sulfatadas y cloruradas. En la imagen, afloramientos de margas triásicas subverticales en Zaragoza.



Materiales volcánicos recientes del archipiélago canario (Isla de Tenerife, macizo del Teide). Las rocas volcánicas presentan unas características geoquímicas que condicionan fuertemente las facies de las aguas subterráneas.

3.2.2. Rasgos geológicos principales de la España peninsular e insular

La península ibérica y el archipiélago balear forman parte de una placa tectónica situada entre Eurasia, al norte, y África, al sur. Esta placa puede subdividirse en dos bloques: el Ibérico y el de Alborán, separados por la línea imaginaria que une las ciudades de Cádiz y Alicante. El bloque de Alborán es considerado por muchos autores como una microplaca independiente. Está formado por parte de la cordillera bética y el archipiélago balear.

El archipiélago canario constituye un edificio volcánico de intraplaca, generado a lo largo de los últimos 30 millones de años sobre la corteza oceánica de la placa africana.

La España peninsular

En la España peninsular pueden distinguirse tres grandes tipos de unidades geológicas: el macizo hespérico, las cordilleras alpinas y las depresiones terciarias.

El macizo hespérico es un conjunto de materiales antiguos, fundamentalmente paleozoicos, de origen ígneo y metamórfico, perteneciente a las raíces de una antigua cordillera generada en la orogenia hercínica o varisca, con algunos bloques ocasionalmente reactivados en la orogenia alpina (por ejemplo, el sistema central). Ocupa la mayor parte del oeste peninsular y, tradicionalmente se subdivide en cinco zonas: cantábrica, asturoccidental-leonesa, centro-ibérica, ossa-morena y surportuguesa. A efectos de su relación con las aguas minerales, se considera una agrupación diferente, más simplificada: hespérico septentrional, comprendiendo las dos primeras de las zonas anteriores y el macizo galaico; hespérico central, coincidente con parte de la zona centro-ibérica; y hespérico meridional, agrupando el sector del macizo situado al sur de la Depresión del Tajo.

Las cordilleras alpinas son relieves relativamente jóvenes, generados en el último gran ciclo orogénico (alpino), y compuestos fundamentalmente por materiales sedimentarios, de edad mesozoica y cenozoica, con algunos enclaves volcánicos submarinos y subvolcánicos. En algunas de ellas, existen afloramientos de los zócalos paleozoicos (zona axial pirenaica y zona interna de la cordillera bética).

Imagen tomada en el año 1885, tras el Terremoto de Andalucía, de efectos devastadores. En la localidad de Alhama de Granada, hoy famosa por sus baños de aguas termales, el terremoto provocó la aparición de los llamados Baños Nuevos.





Dos de las cordilleras alpinas son de borde de placa (Bética y Pirineos), por lo que la complejidad estructural y litológica es mayor (por ejemplo, existen rocas plutónicas ácidas en Pirineos, y ultrabásicas en la cordillera bética). Las otras dos cordilleras alpinas (Ibérica y Costero-Catalana) son de tipo intraplaca. Las series sedimentarias de estas cadenas están constituidas fundamentalmente por materiales carbonáticos, detríticos y evaporíticos.



La zona del pirineo oscense cercana a Panticosa es rica en aguas minerales, algunas de ellas con elevadas temperaturas de emergencia, debido a las grandes profundidades alcanzadas por el flujo hídrico subterráneo.

El tercer gran grupo de unidades geológicas peninsulares lo constituyen las depresiones terciarias, situadas entre los relieves alpinos del macizo hespérico y las cadenas alpinas. Pueden distinguirse, de norte a sur y de este a oeste: Depresión del Ebro, entre Pirineos y la rama aragonesa de la cordillera ibérica; la Depresión del Duero, entre la cordillera cantábrica y el sistema central; la Depresión del Tajo, entre el sistema central y la rama castellana de la cordillera ibérica; y la Depresión del Guadalquivir, entre Sierra Morena y la cordillera bética. El relleno de las depresiones está formado por materiales marinos y continentales detríticos, evaporíticos y carbonáticos de edad terciaria.

El archipiélago balear

Como quedó expuesto anteriormente, el archipiélago balear forma parte del bloque de alborán, microplaca del sur-sureste de la placa ibérica, separado del núcleo continental peninsular por el mar balear. Su estructura y sus series sedimentarias son continuación paleogeográfica de la cordillera bética, y presenta características geológicas similares, con materiales marinos mesozoicos y cenozoicos carbonáticos, detríticos y evaporíticos.

Las islas Canarias

El archipiélago canario constituye un área volcánica reciente, situada en la corteza oceánica de la placa africana, cerca de su borde occidental continental. Está formado por siete grandes islas, alineadas según la dirección ENE-OSO, que posiblemente representa un eje geotectónico mayor. Las series volcánicas detectadas comprenden un complejo basal oligoceno, constituido por sedimentos marinos, rocas volcánicas submarinas y rocas subvolcánicas y plutónicas; una serie volcánica antigua (de 20 millones a 1 millón de años de antigüedad), de carácter basáltico; y una serie volcánica moderna, representada por basaltos en Lanzarote, Fuerteventura, Hierro y Gomera, y con una gran variedad litológica en Gran Canaria y Tenerife.



En algunos lugares del archipiélago canario la temperatura del subsuelo es muy elevada. Por ejemplo, en el Parque Nacional de Timanfaya se induce fácilmente un geyser artificial sólo con introducir una cierta cantidad de agua desde la superficie a través de un pequeño sondeo.

3.2.3. Relaciones entre las características geológicas y las aguas minerales

Las aguas minerales en relación a su temperatura pueden dividirse en aguas frías y termales, según sea su temperatura varios grados superior a la temperatura ambiental media anual del lugar de emergencia. La termalidad de las aguas subterráneas es uno de los criterios más claramente relacionados con las características geológicas del terreno, por que aquella depende netamente del gradiente geotérmico existente en la vertical del punto de emergencia. El gradiente geotérmico normal es de entre 2 y 3 grados centígrados de incremento por cada 100 metros de profundidad, pero algunas circunstancias geológicas pueden incrementar notablemente este gradiente. Un foco típico de termalidad de las aguas es la presencia de zonas de actividad ígnea reciente (volcánica o plutónica). También las zonas de actividad sísmica o de tectónica activa presentan, por lo general, una anomalía geotérmica positiva. De la misma manera, algunas circunstancias locales (circulación profunda y ascenso rápido a través de fracturas) en regiones de gradiente geotérmico normal pueden explicar la presencia en superficie de manantiales termales.

Materiales cuarcíticos paleozoicos de Sierra Morena (Cascada de la Cimbarra, Jaén), donde existen algunos balnearios de agua caliente.



Las aguas minerales frías presentan, habitualmente, un tipo y un grado de mineralización en consonancia con las características litológicas de los terrenos que atraviesan, del tiempo de contacto entre la interfase agua-roca, y del tipo de procesos físico-químicos y biológicos que intervengan. También la presencia de algunos cuerpos mineralizados puede dar lugar al origen de ciertas aguas minerales.

En definitiva, las relaciones entre geología y aguas minerales pueden ser de dos tipos: espaciales y físico-químicas. Las primeras intentan explicar porqué están en ciertos lugares y no en otros las aguas minerales, mientras que las segundas pretenden dar sentido geológico a las características que presentan las aguas minerales, allí donde se encuentran.

a) Espaciales o de localización

Existe una estrecha relación entre la ubicación de las surgencias de aguas minerales y ciertos patrones geológicos. En primer lugar, como ya se ha apuntado, las áreas con gradientes geotérmicos anómalos son propensas a la presencia en superficie de aguas minerales con cierto grado de termalidad. En España esta condición se cumple en algunos segmentos de las cadenas alpinas y en algunos sectores de los relieves hercínicos reactivados en la orogenia alpina. También en determinadas zonas del macizo hespérico con presencia de intrusiones plutónicas y fracturación importante (por ejemplo, las Termas de Lugo en el macizo galaico). Igualmente, ciertas alineaciones tectónicas de importancia cortical parecen favorecer la transmisión del calor prodecente del subsuelo. Los núcleos de aguas termales más importantes se sitúan en el macizo galaico, ligados a materiales plutónicos y redes densas de fracturas alpinas; en Pirineos y la cordillera costera catalana, donde se relacionan igualmente con plutones (Caldas de Bohí, en Lleida) y estructuras frágiles alpinas (Blancafort, en Barcelona); en la cordillera ibérica, donde se sitúa el núcleo de surgencias termales con mayor caudal de la Península (Alhama de Aragón) (Hernández Pacheco, 1954; ITGE, 1994; Sánchez Navarro *et al.*, 1987; Yé-lamos y Sanz, 1998), en relación con circulaciones profundas y elevación rápida a favor de fracturas; y en la cordillera bé-



tica, donde las aguas termales se relacionan con grandes accidentes de salto en dirección (Accidente Cádiz- Alicante, Corredor de las Alpujarras), o en la intersección de los principales sistemas de fracturas (Benavente y Sanz de Galdeano, 1985; Sanz de Galdeano, 1983, 1990).

b) Características físico-químicas de las aguas

Se reparten de manera diferencial en los diferentes dominios geológicos. Esto no quiere decir que ciertas facies hidroquímicas o ciertos tipos de aguas sean exclusivos de un entorno determinado,



Apodyterium (sala de vestuario) de Termas de Lugo

Ciertas grandes fracturas, como la falla de Plasencia, que atraviesa de SO a NE el Hespérico central, parece condicionar la presencia de puntos de aguas minerales, aunque sin una termalidad acusada.

Las zonas con vulcanismo reciente (Islas Canarias, sureste peninsular, Campo de Calatrava y Olot) también favorecen claramente la presencia de aguas minerales (ITGE, 1992; Rodríguez Estrella, 1979), aunque paradójicamente no siempre con la termalidad como característica fundamental.

También, como ya se va apuntando, la presencia de aguas minerales frías se ve condicionada con frecuencia por las características geológicas. En cualquier caso, esta relación puede explicarse más fácilmente en términos de la dependencia entre las características físico-químicas del agua y las diferentes composiciones litológicas presentes en las grandes unidades geológicas.



Pequeña fuente de aguas subterráneas procedentes de los granitos de la Sierra de Madrid.



Agua rica en hierro, surgente de los mármoles Alpujárrides de la Zona Interna de la Cordillera Bética (Albuñol, Almería).

aunque sí que en general existen tendencias que relacionan las facies hidroquímicas dominantes con las grandes unidades geológicas, en función de las características que presentan éstas.

El macizo hespérico ofrece una alta variabilidad en las facies hidroquímicas de las aguas minerales surgentes, reflejo de la variedad y complejidad litológica y estructural existente. No obstante, se pueden establecer algunos patrones. En el hespérico septentrional destaca la abundancia de aguas bicarbonatadas sódicas y, en ocasiones cloruradas, con algunos núcleos de alta temperatura (superior a 30° C) como As Burgas (Ourense). En el hespérico central, pese a la escasez de puntos de agua mineral, la diversidad es la característica más acusada, aunque las facies bicarbonatadas son relativamente abundantes (IGME, 1982; Martín Loeches, 1995; Yélamos, 1993; Yélamos, 1997); un ejemplo de éstas podría ser el Balneario de Montemayor (Cáceres). En el hespérico meridional destaca la presencia de facies sódicas y magnésicas, con concentraciones de cierta densidad de puntos en torno al campo volcánico de Calatrava, como las aguas bicarbonatadas magnésicas del Balneario de Cervantes (Ciudad Real).

En las cordilleras alpinas predominan netamente las facies bicarbonatadas y sulfatadas, típicas de series sedimentarias mesozoicas y cenozoicas. En la cordillera bética se pueden encontrar algunos núcleos de aguas de esta composición con temperatura mayor de 30° C (por ejemplo, Alhama de Granada, o Alicún de las Torres), ligados a los accidentes tectónicos antes citados (Cruz y García Rossell, 1975; Cruz *et al.*, 1972, Fernández Rubio, 1975; Fernández Rubio *et al.*, 1974). También en la Zona Interna de la bética existen aguas con fuerte condicionante litológico, por la presencia de importantes masas de rocas ultrabásicas (peridotitas de la Serranía de Ronda), en el sector occidental.

En las islas Baleares las facies dominantes son igualmente bicarbonatadas (Binifaldó, y Bastida, entre las aguas envasadas).

En Pirineos, en el sector occidental (montes vascos), predominan las facies sulfatadas, con algunas surgencias termales, mientras que en el sector oriental son más frecuentes las aguas bicarbonatadas. En la cordillera costero-catalana destacan por su relativa importancia las aguas cloruradas y sulfatadas sódicas, muchas de ellas con cierto grado de termalidad, relacionadas con los afloramientos del zócalo paleozoico.



Fuente de Civica (Guadalajara), cuyas aguas son citadas en el Tratado del Dr. Limón Montero, por las peculiaridades terapéuticas de las mismas.



La cordillera ibérica presenta facies mayoritariamente bicarbonatadas cálcicas, con una mayor densidad hacia la zona litoral, en sintonía con la abundancia de materiales carbonáticos mesozoicos.

En las depresiones terciarias, las aguas minerales son menos abundantes, y las facies hidroquímicas responden a las litologías presentes en los materiales de relleno de las mismas. En la Depresión del Ebro son muy variadas, sin que pueda definirse una facies dominante (Baños de Fitero, en Navarra, de facies clorurada-sulfatada sódica y 48° C). En la del Duero, predominan las bicarbonatadas (como Babilafuente, en Salamanca). En la Depresión del Tajo destacan, por su abundancia relativa, las facies magnésicas, condicionadas por la presencia de evaporitas ricas en magnesio en sus series terciarias. Un ejemplo clásico es el Agua de Carabaña, en Madrid. En la Depresión del Guadalquivir son las aguas sulfatadas cálcicas las más abundantes, aunque a veces también se encuentran sódicas, como las de Marmolejo, en Jaén.



Galería y pozo de las Aguas de Carabaña (Madrid), producto de la disolución de materiales terciarios de origen evaporítico.

Por último, en las islas Canarias, las facies dominantes son las bicarbonatadas sódicas (Teror, en las Palmas, y Pinalito, en Tenerife), condicionadas por la presencia de materiales volcánicos.

(*) Este texto ha sido redactado con aportaciones de F. Arquer, A. Azcón, P. Florido, E. Garrido, M. Martín-Machuca, J. M. Murillo, R. M. Mateo, E. La Moneca, del IGME y J. González-Yelamos, Universidad Autónoma de Madrid, A. Ramírez, de la Universidad Politécnica de Madrid y F. Cumbreiras.

3.3. Hidrogeología y geoquímica de las aguas minerales

La composición química de las aguas que se consideran como minerales es muy variada y depende de los minerales presentes en los acuíferos, del tiempo de residencia del agua y de la temperatura en los diferentes pasos.

Por tanto se pueden encontrar aguas de muy diferente composición, desde soluciones muy diluidas hasta salmueras con conductividades eléctricas muy superiores al agua del mar.

Desde el punto de vista de los componentes inorgánico se pueden encontrar gases y iones. Entre los primeros se pueden señalar la presencia de oxígeno, nitrógeno, metano, y gases nobles, bien libres o disueltos aunque no disociados. También, en algunos casos, puede detectarse mercurio en forma de gas. El anhídrido carbónico se presenta en forma libre, en las aguas carbónicas naturales además de disuelto y disociado en forma de iones carbonato y bicarbonato. Comportamiento similar tiene el sulfuro de hidrógeno.

Entre los iones, los más abundantes son sodio, potasio, calcio, magnesio, cloruros, sulfatos, nitratos, y bicarbonatos. Su aplicación en diagramas de Stiff y Piper permite una rápida caracterización visual y clasificación.

Los iones mencionados provienen de la disolución de diversos minerales comunes, a los que hay que unir la sílice, procedente de la hidrólisis de silicatos. Además se pueden presentar carbonatos, litio, flúor, boro, arsénico y otros iones en concentraciones menores, pero que pueden conferir propiedades interesantes. Entre estas cabe considerar la que presentan hierro II.

Además se pueden encontrar compuestos orgánicos, bien como tales o formado organocomplejos con algunos iones. Esta materia orgánica, *sensu lato*, puede encontrarse disuelta, en suspensión y emulsión, llegando a presentarse en algunas ocasiones fases líquidas no acuosas.

La composición iónica de las aguas es responsable de los parámetros fisicoquímicos más conocidos de las aguas minerales, como son conductividad eléctrica, pH y potencial redox. Además de la conductividad, el pH puede presentarse en un amplio rango, entre 5,0 y 9,5, en las aguas minerales. Más complejidad tiene el potencial redox, parámetro de difícil medición y aún más compleja asignación a pares específicos de oxidación-reducción. Las aguas naturales normales presentan potenciales positivos, pero es común que este sea reductor en muchas aguas termales y minerales. Otro parámetro fisicoquímico es la radiactividad, consecuencia de isótopos inestables. Aunque alguno de estos isótopos pueden estar en el inicio de la tabla periódica, es la presencia de minerales y gases disueltos de la familia del uranio los responsables de los valores relativamente altos en rocas ígneas frente a otras rocas.

Detalle de una roca ultrabásica de la Serranía de Ronda (Málaga), donde abundan las aguas de mineralización especial.



En la práctica, la determinación analítica de la composición química plantea la necesidad de muestreo y transporte a un laboratorio, donde realizar las determinaciones a partir de los métodos más ade-

cuados. Esto conlleva inevitables modificaciones en algunos parámetros, así como la obtención de resultados que siendo analíticamente correctos tienen que ser interpretados desde el punto de vista hidroquímico. En el primer caso, esta modificación de parámetros como pH, presencia de gases disueltos o concentración de especies derivadas del CO_2 se complica por el desequilibrio de muchas de las aguas minerales con las condiciones fisico-químicas atmosféricas. En otras, la acidificación para metales pesados conlleva una clara modificación del quimismo, así como la desaparición de las diferencias entre metales pesados disueltos en partículas. En ocasiones, incluso con las técnicas portátiles más sofisticadas es difícil de determinar, *in situ*, parámetros tan comunes como el pH. Por ejemplo en aguas de sondeos profundos con SH_2 .

Este desequilibrio se manifiesta con claridad al utilizar alguno de los sistemas de especiación, en su mayoría informatizados, a partir de los datos analíticos de los boletines de laboratorio. Estos suelen poner en evidencia la existencia de un amplio número de pares iónicos, neutros o con carga eléctrica, así como la existencia de minerales o sales químicas en habitual sobresaturación. Por otro lado señalan las dificultades que pueden existir con los parámetros analíticos englobadores, como sílice, arsénico, aluminio o metales pesados con valencia variable. Por efecto del muestreo, como la acidificación para metales pesados, y por las técnicas analíticas pueden incluirse bajo un solo parámetro especies con comportamientos muy diferentes en solubilidad o quimismo.

La aceptación de la existencia de los desequilibrios se utiliza para la determinación de temperaturas *pasadas* de aguas termales, o criptotermales, a partir de la utilización de geotermómetros. Estos se basan en inferir que el agua que aflora se encuentra en equilibrio químico con condiciones de profundidad, y que su enfriamiento es más rápido que la modificación de su química. Se han definido varios geotermómetros, cuyos resultados no son siempre coincidentes entre sí o no concuerdan con otros datos de tipo geológico.

Esta situación revela, en todo caso, que en muchas ocasiones se está ante una caja *caja negra*. Se pueden aventurar hipótesis pausibles sobre las aguas meteó-

ricas de recarga y se conocen datos de las aguas minerales o termales finales, desconociéndose la mayor parte de la información intermedia sobre las reacciones entre el agua y las rocas en las que entra en contacto así como su hidrodinámica.

La termodinámica y cinética de las interacciones entre el agua subterránea y la roca en contacto, son complejas. Además de las disoluciones y precipitaciones congruentes e incongruentes, es necesario tener en cuenta la existencia de procesos de intercambio iónico, que muchas veces son fáciles de suponer pero difíciles de probar, tanto en aspectos cualitativos como cuantitativos.

En general se plantea la existencia de tipos de agua asociados a rocas específicas.

Las rocas calcáreas sedimentarias producen aguas bicarbonatado cálcico-magnésico, de salinidad moderada en caudales que pueden ser muy importantes y variables en el tiempo, en comportamiento kárstico. En general los karst producen aguas frías, pero existen ejemplos de termokarst en toda la Península.



La presencia de ciertas litologías provoca la existencia de aguas de mineralización especial. Los tonos pardos de la imagen corresponden a los suelos de alteración de las peridotitas de la Serranía de Ronda (Málaga).

Las rocas ígneas ácidas, tipo granito, dan lugar a aguas bicarbonatado sódicas, en general de baja salinidad y elevados pH, por hidrólisis de feldespatos alcalinos. Las intermedias (sienitas, granodioritas y dioritas) producen aguas bicarbonatado cálcicas. Por último las ígneas básicas



Panorámica de El Torcal de Antequera (Málaga), uno de los más característicos macizos kársticos de la Zona Externa de la Cordillera Bética, rico en aguas bicarbonatadas cálcicas.

Las evaporitas, especialmente del Keuper y los depósitos finiterciarios, suelen dar salmueras de tipo sulfatado y clorurado sódico, o cloruro-sulfatado cálcicas, magnésicas, sódicas e incluso potásicas. En estos casos, el flujo de agua puede ser, muy somero, e incluso ser prácticamente superficial, como en las lagunas salobres de los miocenos de las cuencas del Ebro y Tajo.

(gabros y peridotitas) dan lugar a la formación, entre otras, de aguas bicarbonatadas o sulfuradas cálcico-magnésicas y ricas en hierro. La existencia de filones de sulfuros metálicos en los batolitos ígneos en sus aureolas metamórficas modifican profundamente el quimismo de las aguas a partir de procesos de oxidación de los sulfuros a sulfatos, acidificación de las aguas y movilización de metales pesados,

como iones solubles, hidróxidos coloidales e incluso complejos inorgánicos u orgánicos. En general el flujo en los macizos ígneos se produce por fisuras y en caudales pequeños. Los sondeos con información disponible (testificación, ec) sobre su geología suelen revelar la existencia de depósitos minerales hidrotermales y este depósito puede afectar a las surgencias. Como excepción al tipo de acuífero fisurado para rocas ígneas cabe señalar aquellos donde los niveles saturados se encuentran parcial o totalmente albergados en potentes capas superficialmente alterados (regolito).

flujos a través de fisuras o cuando existen mezclas de flujos de diferentes profundidades y tiempos de residencia. Este último parámetro, de evidente interés por cuestiones de protección del recurso, puede ser conocido a partir de la determinación de isótopos tanto estables como inestables, siendo los más habituales tritio y carbono 14.

En muchos casos, los flujos profundos son dominantes, lo que explica que las condiciones fisico-químicas de muchos manantiales son estables a lo largo del tiempo. Sin embargo, y salvando las ine-

Afloramiento de rocas graníticas del Sistema Central (Madrid). Estas rocas originan pequeñas surgencias de aguas mineralizadas.



Complicando más la situación, es necesario tener en cuenta la acción bacteriana, incluso a profundidades considerables, y en condiciones fisico-químicas aparentemente adversas para la vida. Su acción puede ser decisiva, como prueban muchos ejemplos en los afloramientos de agua donde se modifica la química del agua. Sería larga la enumeración de especies, así como sus efectos, pero a modo de ejemplo pueden citarse las sulfatoreductoras responsables de los depósitos de azufre de muchos manantiales.

Las consideraciones hidrodinámicas, complejas en cualquier acuífero poroso o kárstico se complican cuando intervienen

vitables consecuencia de las modificaciones tecnológicas en los métodos de análisis, existen casos en los que se puede intuir una relativa importancia de flujos someros a través de una variabilidad natural en la calidad o temperatura de las aguas.

En la línea de lo señalado, es necesario considerar a las aguas minerales y termales dentro de los esquemas de flujos locales y regionales desarrollado por J.Toth. En general, la mayoría de las aguas consideradas corresponderían a flujos profundos, en un esquema simplificador donde a mayor profundidad de flujo corresponde un tiempo mayor de



Cova das Choias, Serra do Courel (Lugo). Surgencia de aguas bicarbonatadas cálcicas en un sistema kárstico.

residencia, una mayor temperatura y mayor solubilidad de minerales.

El agua de recarga de estos flujos, proviene normalmente de la lluvia y de la fusión de nieve, aunque no pueden descartarse los casos de pérdidas de cursos de agua o recargas desde acuíferos más superficiales. El agua meteórica tiene generalmente baja concentración iónica y pH ligeramente ácido. Presenta también oxígeno disuelto, del orden de algunos miligramos litro y un potencial redox oxidante. En todo caso es muy reactiva y a través de su paso por la zona no saturada, en espesores y tiempos reducidos, disuelve una masa relativamente importante de minerales, así como incrementa su contenido en materia orgánica, con la ayuda de los procesos biológicos del suelo.

Esta materia orgánica, más la que puedan encontrarse en las rocas de la zona saturada y procedentes de la génesis de aquellas, es la base para el desarrollo de diferentes cepas de microorganismos que consumen el oxígeno en su respiración. Primero se consume el oxígeno disuelto y luego se reducen diversas especies oxigenado, nitratos, sulfatos y carbonatos/bicarbonatos, produciendo gases y modificando a reductor el potencial redox de las aguas. Éste evidentemente interviene en la solubilidad de algunos minerales y también puede ser alterado por reacciones inorgánicas que a su vez son modificadas, en uno u otro sentido de las reacciones termodinámicas por las condiciones de temperatura y presión.



Manantial de aguas ferruginosas en Vilaza (Ourense)

En las zonas más bajas del subsuelo pueden alcanzarse temperaturas por encima del centenar de grados y presiones superiores por varios centenares de atmósferas.

En el ascenso estas condiciones se suavizan y por tanto se producen modificaciones en el quimismo, como por ejemplo, desgasificaciones. Al mismo tiempo se pueden producir procesos de dilución y *rejuvenecimiento* por mezcla con aguas que han seguido líneas de flujo más superficiales, que pueden llevar a situaciones aparentemente paradójicas como la presencia de oxígeno disuelto en aguas reducidas.

Al final lo que se tiene es un agua, que puede tener una complicada historia hidrogeoquímica, y que fluye mansamente a través del manantial.