

# HIDROGEOLOGÍA DE GALICIA Y TIPOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**RICARDO JUNCOSA RIVERA,  
JORDI DELGADO MARTÍN,  
ROSA MEIJIDE FAILDE,  
JOSÉ MANUEL ÁLVAREZ-CAMPANA GALLO**

## INTRODUCCIÓN

La hidrología es una de las ciencias más antiguas de la humanidad, lo cual está relacionado con la evolución de las necesidades del ser humano. En un principio, las aglomeraciones humanas se formaban alrededor del agua, lagos o riberas, lo cual facilitaba el acceso al recurso y al transporte de personas y mercancías. Uno de los primeros problemas que el hombre encontró fue la transformación mecánica del agua. Las primeras construcciones realizadas para el aprovechamiento del agua comprendían poco de hidrología. En este sentido, las primitivas obras hidráulicas se pueden considerar como los primeros estudios llevados a la práctica realizados por el hombre sobre el agua.

El concepto de *ciclo hidrológico* fue introducido por Aristóteles (384-322 a. C.). La concepción del ciclo tal y como se entendía consistía en que los océanos eran los embalses de la Tierra; de su evaporación se formaban las nubes que, al condensarse, producían la lluvia que formaba las riberas y estas, a su vez, alimentaban los océanos. Vitruvio (100 a. C.) mantiene esta misma idea y únicamente en el siglo xv Leonardo Da Vinci trata de estimar sus componentes principales. Pero solo Pierre Perrault (siglo xvii) comparó medidas de lluvia con la descarga estimada del río Sena, para demostrar que la escorrentía era cerca de la sexta parte de la precipitación.

El principal progreso de la hidrología empezó realmente a partir de 1930; los desarrollos agrícola, industrial y económico influyeron decididamente en el impulso del estudio de los problemas eventuales de carestía de agua. Con ello, la planificación hidrológica y el estudio de la disponibilidad de los recursos hídricos adquieren especial relevancia. Asimismo, el estudio del ciclo hidrológico, tanto en su componente superficial como subterránea, se ve potenciado a raíz del desarrollo técnico de los últimos cien años.

En el caso del conocimiento de las aguas subterráneas en Galicia nos enfrentamos a un problema doble. Por una parte, la investigación de las aguas subterráneas, en particular la de medios geológicos de baja permeabilidad en clima templado, está menos avanzada que las disciplinas de la hidrología e hidráulica superficial. Y, por otra parte, el conocimiento hidrogeológico de nuestro ámbito territorial ha sido, tradicionalmente, poco considerado y estudiado. En este escenario, tampoco resulta demasiado extraño que la gestión pública de las aguas en Galicia se haya decantado casi exclusivamente por las aguas superficiales.

Esto último contrasta con el hecho de que realmente las aguas subterráneas son importantes en Galicia. No solo porque han permitido el modelo de asentamiento disperso que caracteriza nuestra original geografía,

sino porque las aguas subterráneas han tenido y tienen unas importantes funciones socioeconómicas y ecológicas. Pero, además, porque en distintas localidades nuestras aguas subterráneas poseen unas singulares cualidades de mineralización y termalismo que han propiciado la existencia de una particular cultura balnearia. El uso de las aguas, y en particular el de las aguas subterráneas, es una constante vinculada a la cultura histórica y contemporánea de nuestra tierra.

En respuesta a esta situación, y con respecto a la cuenca del río Mandeo, se plantean en este capítulo dos enfoques fundamentales: un análisis de la hidrogeología gallega en un contexto regional y local en la cuenca del Mandeo, desde el punto de vista físico, y un análisis socioeconómico de las aguas subterráneas en ambos contextos.

## 1. HIDROGEOLOGÍA DE GALICIA: MEDIO FÍSICO

### 1.1. Marco geológico y características hidrogeológicas asociadas

#### 1.1.1. Hidrogeología en Galicia

Galicia se encuentra en el vértice noroccidental de la península ibérica. Desde el punto de vista geológico, su territorio pertenece a la cadena hercínica y, de modo más específico, a un amplio afloramiento dominado por rocas ígneas y metamórficas denominado macizo hespérico o ibérico. En algunos sectores, el macizo hespérico se encuentra parcialmente recubierto por depósitos sedimentarios más recientes.

La geología de Galicia es, en detalle, muy compleja, tanto desde el punto de vista de la edad de las rocas que componen su sustrato, como por su diversidad. De ese modo, es posible encontrar en Galicia rocas que van

desde el precámbrico hasta la actualidad. Asimismo, desde el punto de vista tectónico, algunas de estas rocas se han visto sometidas a la acción de esfuerzos asociados a distintas orogenias: caledoniana, herciniana y alpina. De todas ellas, es la herciniana —acaecida a finales del carbonífero— la que ha dejado la impronta más significativa, y a ella se debe la distribución y propiedades de la mayor parte de los materiales geológicos que en la actualidad podemos observar. No vamos a hacer una exposición detallada de la geología de Galicia en este capítulo; para ello remitimos al lector a la amplia y variada bibliografía existente (por ejemplo, las revisiones de Gibbons y Moreno, 2002; y Vera, 2004), así como a la extensa documentación atesorada por el Instituto Universitario de Geología Isidro Parga Pondal, heredero del histórico Laboratorio Geológico de Laxe<sup>1</sup>.

A modo de resumen indicaremos que las principales litologías aflorantes en Galicia pueden resumirse en las siguientes categorías:

1. Rocas metasedimentarias: calizas y dolomías (transformadas en mármoles), cuarcita, pizarra, esquistos y paragneises. Se trata de rocas originalmente sedimentarias afectadas por procesos metamórficos relacionados con periodos orogénicos.
  - a. Calizas y dolomías: localizadas en la parte oriental de Galicia en una serie de bandas que van desde Mondoñedo, al norte, hasta Valdeorras, pasando por Fonsagrada, Becerreá y el Caurel.
  - b. Cuarcitas. Están bien desarrolladas en la zona centro-oriental de Galicia. Por el carácter que le confieren al paisaje, dan lugar a destacados resaltes orográficos.
  - c. Pizarras. Muy bien desarrolladas en muchas zonas de Galicia y, en particular en su zona oriental.

<sup>1</sup> <http://www.udc.es/iux/>

d. Esquistos. También muy extendidos en Galicia, principalmente en la zona centro-occidental.

e. Paragneises. Entre ellos destacan la formación Olla de Sapo, que aflora en una gran estructura antiformal que va desde O Barqueiro hasta Zamora.

2. Rocas graníticas. Afloran en toda Galicia, con especial importancia en la zona central y occidental.
3. Rocas básicas y ultrabásicas, como anfíbolitas, gabros, dioritas, peridotitas, serpentinitas, dunitas, granulitas y eclogitas. Su localización se centra en el entorno del Cabo Ortegal, Bergantiños, Santiago, Lalín y Sobrado-Melide.
4. Cuenca terciarias rellenas de materiales detríticos (arcillas, limos, conglomerados y, en ocasiones, niveles de lignito). Las principales de estas cuencas son las de As Pontes, Meirama, Vilalba, Guitiriz, Sarria, Monforte, Quiroga, Valdeorras, Maceda, Xinzo da Limia y Verín.
5. Depósitos cuaternarios entre los que cabe citar sedimentos aluviales, depósitos de ladera, depósitos glaciares y fluvioglaciares, de marisma, playa, eólicos (por ejemplo, el complejo dunar de Corrubedo), así como cordones litorales.

Aun reconociendo esta amplia variedad, son dos los tipos litológicos predominantes: las rocas graníticas y las pizarroso-esquistosas. El resto queda netamente subordinado en cuanto a extensión y abundancia (figura 1). Es importante destacar que la circulación de las aguas subterráneas a través del subsuelo tiene un carácter integrador, de modo que sus composiciones químicas reflejan, hasta cierto punto, esa predominancia litológica observada. No obstante, esto no significa que las aguas subterráneas tengan una composición poco variable y anodina (por

ejemplo, las calizas y dolomías o las rocas ultrabásicas, ambas de desarrollo local, dan lugar a improntas características), ya que otros factores tales como el tiempo de residencia, la proximidad a la costa o la posibilidad de fenómenos de mezcla propician una mayor riqueza composicional.

Las rocas ígneas fracturadas y las rocas metamórficas suelen denominarse de forma un tanto laxa como *rocas cristalinas* (Banks y Robins, 2002). La totalidad del territorio gallego (con la excepción de alguna pequeña cuenca sedimentaria terciaria) se compone de afloramientos rocosos de estas características. En términos hidrogeológicos, las rocas cristalinas se caracterizan por ser un medio heterogéneo y anisótropo, con una estructuración muy compleja y sistemas de flujo irregulares e incluso caóticos. Las redes de flujo, a menudo, coinciden con zonas abiertas y bien comunicadas de fracturas o zonas de fractura (porosidad de fractura). A menudo, los macizos cristalinos están recubiertos por un regolito superficial, más o menos potente, producto de su propia meteorización o de la acumulación de sedimentos no consolidados (porosidad intergranular; figura 2).

Las regiones en donde los macizos cristalinos están bien desarrollados se caracterizan, también, por presentar una gran variedad de tipos petrológicos: rocas ígneas ácidas, intermedias o básicas, esquistos, pizarras, gneises, migmatitas, granulitas, cuarcitas, mármoles, anfíbolitas... Por lo tanto, de acuerdo con sus características, cada una de ellas presentará un comportamiento distinto frente a la meteorización (que, para un entorno climático dado, será más o menos fácil) y la deformación (desarrollando o no planos de discontinuidad). Por todo ello, el entorno hidrogeológico e hidroquímico de los acuíferos en sistemas cristalinos resulta muy distinto al de los medios sedimentarios. Así, en las rocas cristalinas, el tamaño de los acuíferos suele estar asociado a la existencia de cuerpos geológicos concretos, ya que, por ejemplo,

aspectos tales como la porosidad intergranular van perdiendo importancia a medida que la edad de los materiales aumenta. En ese sentido, el grado de metamorfismo y la tectónica condicionan la mejor o peor preservación de la porosidad intergranular, así como la aparición de porosidad de fractura. Por ello, muchas rocas cristalinas presentan un esquema de porosidad que a menudo se refiere como dual y cuyo comportamiento hidráulico es complejo.

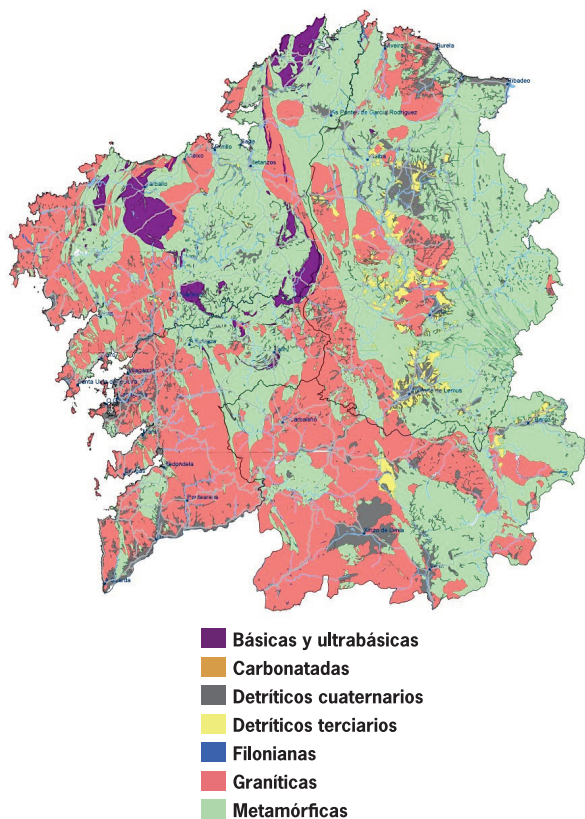


Figura 1. Mapa litológico de Galicia con indicación de los principales grupos de rocas

Fuente: Servicio de Información Territorial de Galicia, SITGA (<http://sitga.xunta.es/>)

En el pasado, la hidrogeología de los macizos cristalinos no ha gozado de gran interés, salvo en regiones en las que el agua es un recurso especialmente valioso y escaso. Sin embargo, esta tendencia ha cambiado a partir de los años noventa del pasado siglo al demostrarse lo siguiente:

- Los recursos de agua subterránea en macizos cristalinos —en particular cuando estos

ocupan los relieves montañosos en la cabecera de ríos— suelen ser lo bastante importantes como para cubrir la demanda y mantener, aun así, un apreciable caudal en los ríos, incluso en épocas de sequía.

- En relación con la explotación, los macizos cristalinos suelen poseer reservas suficientes para satisfacer la demanda de amplias zonas cuya población, como es el caso de Galicia, está muy dispersa.
- A diferencia de lo que se pensaba hace algunos años, las unidades acuíferas implantadas en macizos cristalinos son susceptibles, también, de sufrir el impacto de la polución superficial. Actividades tan destacadas en Galicia como son la explotación de aguas minerales o la extensa red de balnearios son especialmente sensibles a la contaminación de las aguas subterráneas.
- Las actuaciones propias de la ingeniería civil y de la minería (por ejemplo, la excavación de túneles) requieren, a menudo, de un profundo conocimiento de las pautas de distribución y movimiento del agua en el terreno.

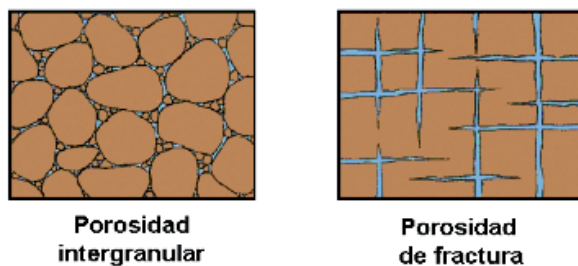


Figura 2. Esquemas de porosidad intergranular y de fractura. Cuando los dos tipos de porosidad están presentes en un mismo macizo, se habla de porosidad dual.

Fuente: modificado de Freeze y Cherry (1979)

A diferencia de lo que sucede con la práctica totalidad de formaciones sedimentarias, el comportamiento hidrodinámico de los macizos cristalinos está fuertemente condicionado por las características de la matriz rocosa y sus discontinuidades. En general, la permeabilidad de la matriz rocosa no alterada de un macizo cristalino es muy baja,

por lo que su capacidad para transmitir y almacenar agua es también pequeña. Sin embargo, no es raro que un macizo cristalino presente una elevada permeabilidad y una no despreciable capacidad de almacenamiento, ya que son las discontinuidades las que condicionan el flujo preferente del agua.

En macizos fracturados, la mayor parte de la porosidad guarda una estrecha relación con las discontinuidades, de modo que, a mayor grado de fracturación, mayor es la porosidad del macizo. No obstante, la forma en la que las fracturas se relacionan entre sí condiciona que estas sean capaces de transmitir agua con mayor o menor eficacia, lo que da lugar a valores de permeabilidad alto, moderado y bajo.

En consecuencia, la elevada precipitación y la densa red hidrológica, junto con las particularidades geológicas, hacen que —a excepción de las cuencas intramontañas— el modelo hidrogeológico dominante en Galicia sea el de acuíferos superficiales, de tipo libre, esto es, con régimen de presiones hidrostáticas equivalentes que corresponden principalmente a las presiones superficiales. A continuación describimos algunas de las características hidrodinámicas de los principales tipos litológicos que afloran en Galicia:

- Formaciones carbonatadas (calizas y dolomías) y cuarcíticas. La porosidad tiene un importante componente secundaria (porosidad de disolución en las carbonatadas y de fractura, tanto en las carbonatadas como en las cuarcíticas). Son las litologías que presentan una mayor permeabilidad de entre las que afloran en el macizo hespérico. Es frecuente encontrarlas karstificadas, con lo que el flujo de agua a través de ellas se produce de forma relativamente rápida y canalizada. Ello confiere a las aguas subterráneas que circulan a través de estas unidades unas características propias y distintivas. Ejemplo

de las unidades carbonatadas de Galicia son la formación Vegadeo (sobre la que se ha desarrollado el sistema kárstico conocido como la Cova do Rei Cintolo, en Mondoñedo), la antigua explotación de Pb-Zn de Rubiais (próxima a Pedrafita do Cebreiro), así como los distintos paquetes carbonatados asociados al grupo de Cándana (bien desarrollados en las inmediaciones de Riotorto, Triacastela y Sarria). Las rocas cuarcíticas suelen presentar una porosidad intergranular muy pequeña.

- Litologías ígneas y rocas metamórficas de distinto grado. Cuando se trata de rocas frescas (poco o nada meteorizadas), su porosidad está asociada al desarrollo más o menos intenso de fracturas. En el caso particular de las rocas metamórficas, es destacable la existencia de una o varias familias de foliación (por ejemplo, esquistosidad, pizarrosidad, etc.). La meteorización *in situ* de estas rocas da lugar al desarrollo de un manto de alteración superficial (regolito) de potencia no uniforme que, en el caso particular de las rocas graníticas, se denomina *jabre* y, en el de las rocas esquistosas, *tobre*. El regolito puede llegar a tener un espesor superior a alguna decena de metros y su comportamiento hidrodinámico es muy distinto al del resto del macizo rocoso, asemejándose al de las arenas y las gravas. Por ello, suelen constituir acuíferos someros, con una capacidad de almacenamiento alta (limitada por su extensión) y un pequeño tiempo de residencia. Muchos pozos y manantiales en Galicia se emplazan sobre estas unidades. La permeabilidad en las rocas ígneas y metamórficas está asociada a la fisuración y, como hemos dicho anteriormente, al grado de alteración. La recarga al medio subterráneo se produce a través de las discontinuidades del macizo, por lo que la respuesta del nivel freático suele ser muy rápida. Estas variaciones bruscas del nivel freático asociado a la entrada de agua en las fracturas da lugar, a menudo, a problemas de estabilidad en laderas, como resultado

del aumento de las presiones de agua y la consecuente disminución de la tensión efectiva. En las rocas ígneas y metamórficas, las discontinuidades pueden estar ocupadas o no por rellenos minerales —frecuentemente arcillosos—, lo cual limita el fácil acceso del agua. Por lo tanto, la geometría y la distribución de unidades acuíferas son mucho más difíciles de delinear y de evaluar. En términos generales, la permeabilidad media de estos materiales es baja, aunque puede llegar a ser alta o muy alta cerca de la superficie, donde suele ser más intensa la fracturación y donde las discontinuidades están más abiertas. A medida que profundizamos en el macizo fracturado, las tensiones debidas al peso propio de los materiales geológicos y el confinamiento determinan que las discontinuidades estén mucho más cerradas, lo que dificulta el flujo de agua. Los *jabres* y *tobres* suelen tener un rango de coeficientes de permeabilidades que va desde los  $10^{-3}$  a  $1 \text{ m/día}$  y su comportamiento hidrodinámico es análogo al de un sedimento detrítico. El desarrollo regional de *jabres* y *tobres* es desigual, puesto que, como hemos visto con anterioridad, la tendencia a la meteorización de una roca no solo es función de las condiciones ambientales, sino también de la mineralogía que la conforma. Sea como fuere, estas unidades pueden constituir buenos acuíferos locales aunque significativamente vulnerables a la contaminación debido a: a) el pequeño tiempo de tránsito del agua a través de ellos; b) la baja reactividad de los minerales silicatados que los conforman, y el escaso tiempo de tránsito; c) el bajo poder autodepurador.

- Cuenca terciarias. Desde el punto de vista territorial son relativamente poco extensas y discontinuas. Se trata de una serie de cuencas de sedimentación que en la actualidad ocupan depresiones en el relieve. Ejemplo de ellas son la de As Pontes de García Rodríguez, Meirama, Maceda, Quiroga, Monforte de Lemos, Sarria, Junceda, Visantóna, Guitiriz, Pastoriza y Vilalba. En las cuencas de Xin-

zo de Limia y Verín los materiales terciarios se encuentran recubiertos por materiales cuaternarios, si bien la presencia del terciario se ha verificado mediante diferentes sondeos. En conjunto, están rellenas de materiales arenosos, arcillosos, gravas y, en algunas ocasiones, capas lignitíferas, por lo que alcanzan espesores de relleno que pueden llegar a los centenares de metros. Desde el punto de vista hidrogeológico, estas cuencas dan lugar a acuíferos de tamaño pequeño a mediano de gran interés desde el punto de vista de la explotación local. La permeabilidad media de estas unidades es más bien baja, debido a la existencia de una elevada proporción de arcillas y limos. Su porosidad es, sobre todo, de tipo intergranular.

- Sedimentos cuaternarios. Son depósitos continentales relacionados con la red fluvial actual (aluviones) y como producto de la erosión parcial de los materiales terciarios, así como de la continua denudación de los rebordes montañosos preterciarios (coluviones) en puntos concretos, e incluso ambientes de sedimentos de origen glaciar o fluvio-glaciar. Los más relevantes desde el punto de vista hidrogeológico son las terrazas aluviales de los ríos Sil y Miño (Vidal Romaní y Yepes, 2001), que se encuentran en Tui, Monforte y Valdeorras, así como los aluviales de los ríos Ulla, Umia y Grande. Mención aparte merecen afloramientos singulares como el del complejo eólico de Corrubedo, estudiado desde el punto de vista sedimentario e hidrogeológico por Rey *et al.* (2004).

### 1.1.2. Hidrogeología de la cuenca del Mandeo

La cuenca del Mandeo discurre por varias formaciones geológicas que le confieren una hidrogeología singular dependiendo del grado de alteración que presente el zócalo geológico. En la descripción geológica realizada en la serie de MAGNA (mapas n.º 45, Betanzos, y n.º 46, Guitiriz, principalmente) se

puede destacar una zona alta morfológicamente (que llega a sobrepasar los 700 m) en cabecera de cuenca y una zona que tiende a la expansión en las zonas bajas de la cuenca (a cotas inferiores a los 200 m), que corresponden al mayor abundamiento de afloramientos de aguas al ser zonas de descarga subterránea. Las zonas más altas son zonas principales de recarga cuya infiltración, detención superficial y almacenamiento en el terreno dependerá del grado de alteración del regolito.

Desde un punto de vista geológico, la cuenca del Mandeo nace en una zona de granitos de dos micas deformado tanto débil como pronunciadamente. La cuenca, en sus tramos medios abarca tanto una zona de esquistos como otra de pizarras y cuarcitas; es decir, rocas metamórficas. En la zona de cuenca baja alternan las filitas con la existencia de depósitos cuaternarios que confieren, estos últimos, las masas de agua subterránea más sustanciales, sobre todo en las zonas aluviales del río.

En consecuencia, las permeabilidades asociadas a las litologías existentes en la cuenca están intrínsecamente relacionadas con el grado de alteración del regolito, la fisuración y la conectividad de las diaclasas y fracturas del material geológico subyacente.

## 1.2. Calidad y tipos de aguas subterráneas

### 1.2.1. Calidad natural de las aguas subterráneas en Galicia

Tal y como expone la Directiva Marco del Agua, las aguas subterráneas se inscriben dentro del ciclo hidrológico y su calidad natural está relacionada con las distintas contribuciones y procesos de interacción que, a lo largo del ciclo, estas experimentan.

La importancia de la interacción de agua y roca en el medio subterráneo fue puesta de

relieve por Chebotarev (1955), quien, en una serie de trabajos, publicó una teoría que justificaba la composición química de la mayor parte de las aguas subterráneas naturales como resultado de su reacción con distintos tipos de litología y prolongados tiempos de residencia. A partir de ahí, muchos autores han desarrollado una amplia bibliografía, de entre la que destacamos las obras de Hem (1991), Stumm y Morgan (1995), Langmuir (1996) y Drever (1997). La composición química de las aguas naturales obedece a muchos factores, entre los que se incluyen los gases y aerosoles atmosféricos, la meteorización y erosión superficial de las rocas y suelos (con su componente biológica), la disolución y precipitación de minerales lejos de la superficie, así como la propia actividad humana. Su estudio y el de los procesos con los que se interrelaciona suele realizarse a través de la aplicación de los principios de la termodinámica química, aunque, si bien es cierto que algunos de estos procesos tienen lugar muy cerca del equilibrio químico, no es menos cierto que otros, de carácter irreversible, requieren tener en cuenta los mecanismos y velocidades de reacción propios de la cinética química.

La forma en la que los solutos se incorporan al agua o cómo, a partir de esta, precipitan es algo que depende de factores ambientales (por ejemplo, el clima y la estructura tectónica) y bioquímicos. Estos últimos están asociados a los ciclos vitales de plantas y animales, tanto microscópicos como macroscópicos.

Los parámetros fundamentales que se emplean en la determinación de la calidad de las aguas suelen obtenerse a través de análisis químicos de muestras de agua realizados tanto en el laboratorio como en el campo. El muestreo de aguas es una faceta de gran importancia y requiere cierto grado de especialización y conocimiento. Baste mencionar que los cuerpos de agua superficiales no suelen presentar una composición homogé-

nea o que algunos constituyentes del agua requieren ser preservados adecuadamente, a fin de que su valor bajo obtenga unas condiciones lo más parecidas posibles a las del medio natural.

Tras analizar el agua, los resultados analíticos deben agruparse y estudiarse desde un punto de vista estadístico mediante el empleo de descriptores adecuados (media, mediana, curvas de frecuencia de distribución, etc.) o bien mediante análisis correlacionales (simples o múltiples). En este proceso juega un papel muy importante la representación gráfica de los datos, de modo que, a partir de ellos, sea fácil establecer aspectos tales como cuál es la fuente probable de los solutos, relaciones químicas entre componentes, variabilidad espacial y temporal o la evaluación de los recursos. Así, los gráficos suelen mostrar los análisis de aguas de acuerdo con su composición química o razones entre iones seleccionados (véase Hem, 1991, y Hounslow, 1995). La relación existente entre la calidad del agua y sus características hidrogeológicas (tales como los caudales de las corrientes superficiales, o los esquemas de flujo subterráneo) puede mostrarse a través de ecuaciones matemáticas, gráficos o mapas.

El agua subterránea empieza a adquirir su composición en el mismo momento en que se produce la condensación en las nubes, por lo que, conceptualmente, este sería el primer paso de la secuencia evolutiva (Appelo y Postma, 1992). Cuando el agua de lluvia inicia su infiltración a través del suelo y las rocas, empieza a incorporar solutos a su composición y es una circunstancia muy frecuente que la salinidad del agua aumente con el tiempo de residencia en el acuífero (figura 3).

Los solutos del agua también forman parte del ciclo geoquímico. Este se inicia con la meteorización de las rocas, que es el proceso que descompone las rocas y muchos

de los minerales que las componen. En este proceso, de acuerdo con distintas reacciones químicas, algunos constituyentes de las fases sólidas pasan al agua en forma de solutos. Por otro lado, en los suelos, la descomposición de la materia orgánica libera ácidos que disuelven los minerales dentro de lo que se ha dado en llamar *ciclo bio-geoquímico*.

La meteorización es tanto más intensa cuanto más cálido y húmedo es un clima, pero es igualmente eficaz en latitudes que, como Galicia, gozan de un ambiente atemperado. No obstante, no todos los minerales son susceptibles de meteorizarse a igual velocidad, lo cual condiciona un fraccionamiento químico (que puede expresarse a través de la Serie de Goldlich; figura 4) que se traslada, a su vez, a la composición del agua.

Debido a que los procesos mencionados anteriormente varían en tiempo e intensidad de un lugar a otro, la composición de las aguas subterráneas es bastante variable. No obstante, el número de componentes mayoritarios del agua es muy limitado y su variabilidad (en cuanto a rangos de concentración) no es tan importante como pudiéramos esperar a tenor del gran número de litologías y procesos de interacción (orgánicos e inorgánicos) existentes. Así, de acuerdo con Davis y De Wiest (1966), de los veintidós elementos que conforman el 99,8 % de la masa combinada de la litosfera superior, los océanos y la atmósfera, tan solo siete se encuentran normalmente en el agua con concentraciones mayores a 1 mg/l (tabla 1). Estos siete elementos dan cuenta del 95 % de la composición química de las aguas subterráneas. Junto a estos, existen otros ocho componentes menores usualmente detectados en las aguas subterráneas, aunque con concentraciones menores (0,01-1 mg/l). El resto de elementos químicos están típicamente presentes como constituyentes traza (< 0,01 mg/l).



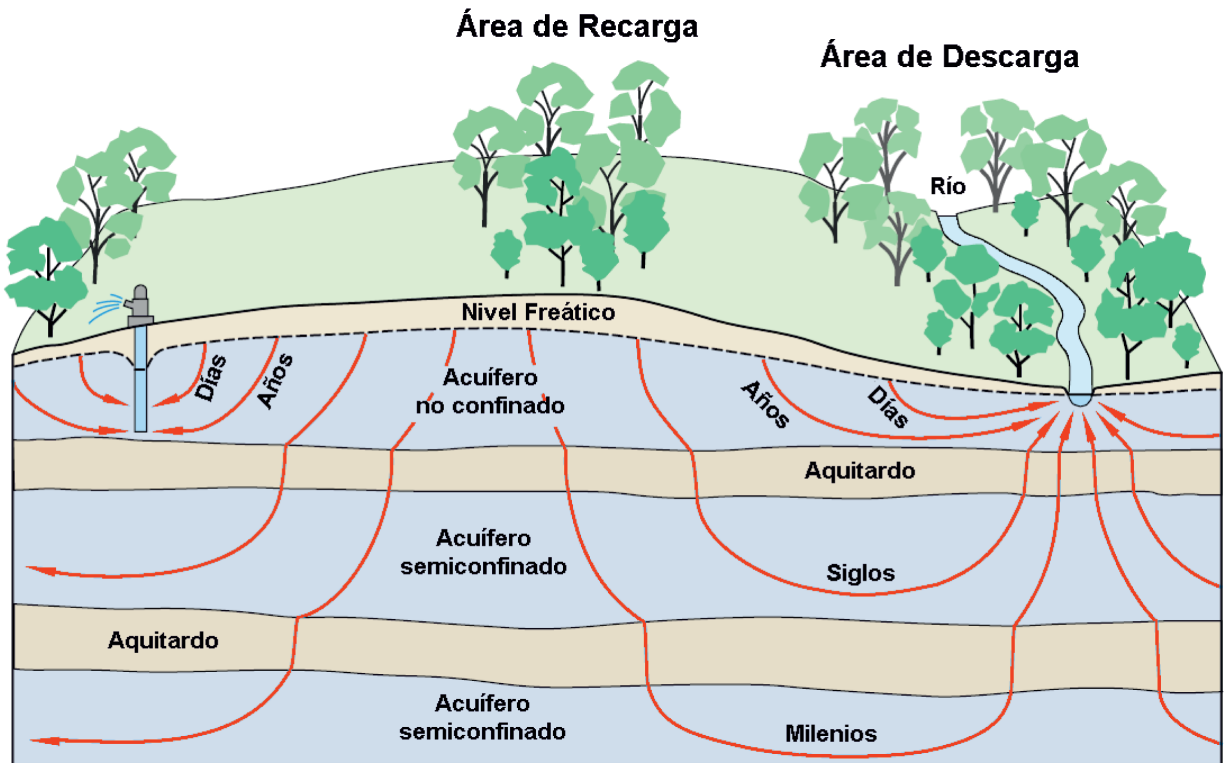


Figura 3. Tiempo de residencia y escalas de flujo en las aguas subterráneas, desde las zonas de recarga hasta las de descarga

Fuente: figura modificada de Winter et al. (1998)

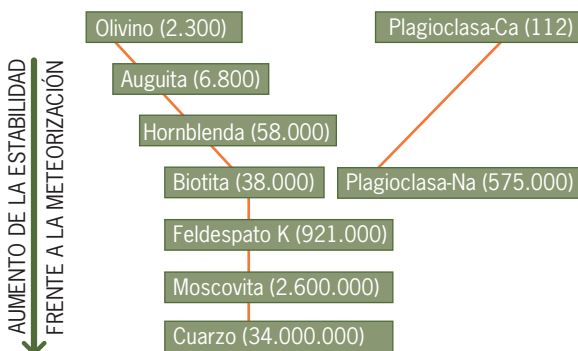


Figura 4. Serie de meteorización de Goldlich. Los números que acompañan al nombre de cada mineral corresponden a los años necesarios para disolver un cubo de 1 mm<sup>3</sup>, a pH 5 y 25 °C.

Fuente: figura modificada de Langmuir (1996)

El movimiento del agua a través de la zona no saturada determina que la concentración de sus constituyentes mayores tienda a aumentar. De ese modo, Chebotarev (1955), en un trabajo fundamental, en el que consideró más de diez mil análisis de aguas subterráneas de Australia, concluyó

que estas tienden a evolucionar químicamente hacia la composición del agua de mar. Este mismo autor observó que la evolución se acompaña, normalmente de cambios regionales en el anión dominante de acuerdo con la pauta indicada por la figura 5. Las figuras 6 y 7 ilustran también, aunque desde un punto de vista más amplio, esta misma observación.

La figura 8 presenta un resumen relativo a la hidroquímica de distintos tipos de agua subterránea (de manantial y termales), de lluvia y ríos cuyo curso discurre sobre una única litología. Debe destacarse la gran variabilidad de composiciones, algo esperable en función de lo expuesto en las secciones anteriores. A continuación proporcionaremos algunas ideas relativas a las características más destacables de las aguas asociadas a los principales grupos litológicos presentes en el territorio gallego (Delgado *et al.*, 2009).

Tabla 1. Selección de constituyentes químicos presentes en las aguas subterráneas naturales

MAYORES	MENORES	TRAZA	
Calcio (Ca)	Potasio (K)	Aluminio (Al)	Molibdeno (Mo)
Magnesio (Mg)	Hierro (Fe)	Arsénico (As)	Níquel (Ni)
Sodio (Na)	Manganeso (Mn)	Bario (Ba)	Fosfato (PO <sub>4</sub> )
Bicarbonato (HCO <sub>3</sub> )	Estroncio (Sr)	Cadmio (Cd)	Radio (Ra)
Cloruro (Cl)	Boro (B)	Cromo (Cr)	Selenio (Se)
Sulfato (SO <sub>4</sub> )	Fluoruro (F)	Cobalto (Co)	Plata (Ag)
Sílice (SiO <sub>2</sub> )	Carbonato (CO <sub>3</sub> )	Cobre (Cu)	Uranio (U)
	Nitrato (NO <sub>3</sub> )	Plomo (Pb)	Zinc (Zn)
		Mercurio (Hg)	Sulfuro (H <sub>2</sub> S, HS)

Fuente: modificado de Davis y De Wiest (1966)

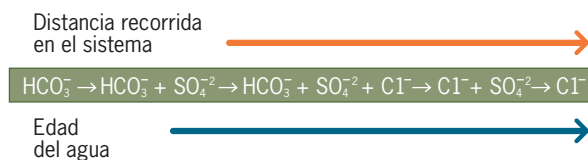


Figura 5. Secuencia de evolución hidroquímica de las aguas subterráneas naturales, de acuerdo con Chebotarev (1955)

## Rocas silicatadas cristalinas de grano grueso y medio

Este grupo incluye litologías ígneas y metamórficas tales como los granitoides, gneises y anfibolitas. Su porosidad primaria es muy pequeña pero, a menudo, su permeabilidad y porosidad está asociada a la existencia de sistemas de fractura más o menos desarrollados e interconectados. En Galicia son ejemplo de estas rocas los materiales esquistosos del complejo de Órdenes o los macizos graníticos (granitoides precoces y tardíos) tan ampliamente desarrollados a lo largo y ancho de nuestra geografía. La meteorización de estas rocas bajo condiciones climáticas adecuadas puede conducir a la formación de un regolito superficial (*jabres*, cuando se trata de rocas ígneas, y *tobres*, cuando se trata de rocas esquistosas) que sue-

le albergar acuíferos someros. Estas masas de agua son las más frecuentemente explotadas en captaciones domésticas.

La calidad química de las aguas extraídas de macizos de rocas ígneas y metamórficas es, en general, buena. Prueba de ello es la importante industria del agua mineral de esta comunidad, así como el hecho de que la mayor parte de los manantiales y fuentes termales de Galicia se localizan sobre estos tipos de litología.

Desde un punto de vista descriptivo, aguas procedentes de un mismo tipo de macizo geológico pueden presentar características hidroquímicas muy distintas. Así, es un hecho normal que las aguas que tienen circuitos de circulación más profundos —y, por lo tanto, mayor tiempo de residencia— presenten una mayor mineralización que las someras. Además, en los puntos de descarga superficial es posible la mezcla de los dos tipos de circuito, con lo que no es raro hablar de familias de aguas de características hidroquímicas análogas antes que de tipos puros. La mayoría de las aguas que han circulado a través de litologías silicatadas de grano medio y grueso tienden a ser bicarbonatadas sódico-potásicas.

No obstante, en algunas fuentes termales, así como en manantiales próximos a la costa, la componente clorurada puede ser muy importante (por ejemplo, en los manantiales termales de A Toxa, Caldas de Reis, etc.). Por otro lado, muchas rocas ígneas y metamórficas contienen cantidades más o menos importantes de sulfuros, en especial pirita (FeS<sub>2</sub>). El ascenso de aguas profundas —donde imperan condiciones anóxicas— a la superficie puede que se verifique de tal forma que las especies de sulfuro disueltas no se oxiden a sulfato, de modo que aparezcan manantiales o fuentes de aguas sulfurosas (por ejemplo, balneario de Guitiriz, Baños da Brea, termas de Cuntis, baños viejos de Carballo, etc.). La oxidación de los sulfuros puede dar lugar a la aparición de cantidades más o menos importantes de sulfato en las aguas.

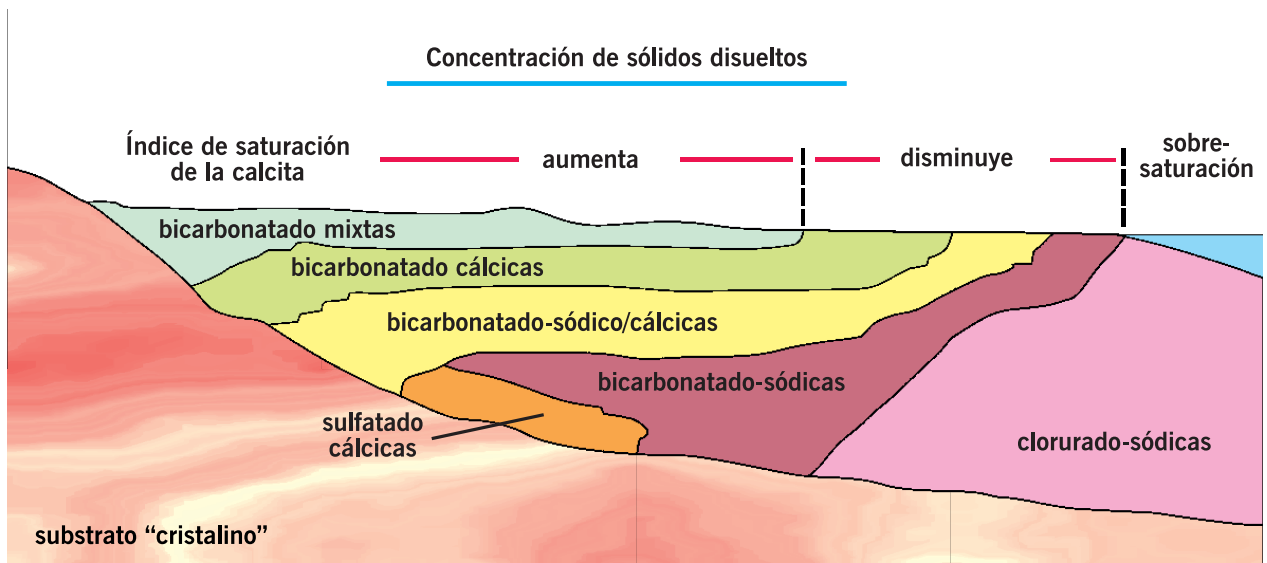


Figura 6. Evolución de las características geoquímicas de las aguas subterráneas en un entorno de llanura litoral

Fuente: figura modificada de Winter et al. (1998)

### Rocas silicatadas esquistosas y carbonosas de grano fino

Esta tipología incluye familias de rocas tan importantes como las pizarras y las filitas. En general, tienen una permeabilidad primaria muy pequeña pero, durante su deformación, suelen desarrollar una buena porosidad secundaria (de fractura), lo que hace aumentar significativamente su permeabilidad. En general, las pizarras y filitas están compuestas por aluminosilicatos, micas, cuarzo y óxidos de hierro, minerales, todos ellos, de una relativamente baja solubilidad. Por ello, su meteorización suele aportar pocos solutos al

agua. Este no es el caso de estas rocas cuando alternan con otros materiales más solubles (por ejemplo, con rocas carbonatadas).

Algunas de estas rocas (como las pizarras ampelíticas) pueden contener cantidades importantes de pirita u otros minerales sulfurados susceptibles de liberar especies de azufre reducido al agua (aguas sulfurosas) o bien, tras su oxidación, aportar cantidades apreciables de sulfato. Si el proceso de oxidación es muy intenso y la proporción de sulfuros de Fe es alta, es posible la generación de sulfato, así como la solución de  $Fe^{+2}$ , que más tarde se transformará en  $Fe^{+3}$ .



Figura 7. Procesos hidro-termo-geoquímicos susceptibles de modificar las características químicas de las aguas subterráneas

Fuente: figura modificada de Winter et al. (1998)

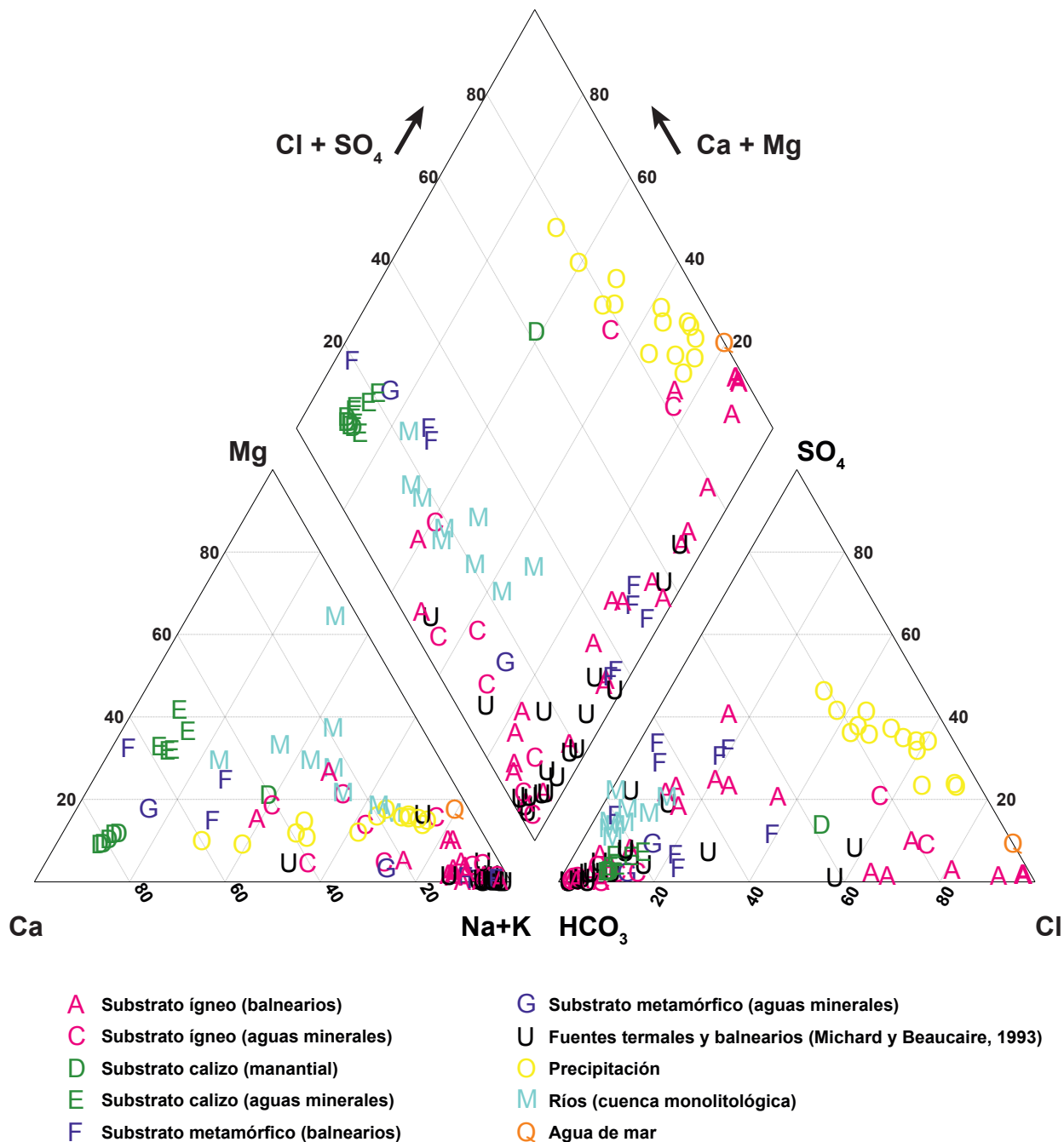


Figura 8. Diagrama de Piper-Hill en el que se presentan los datos publicados relativos a la composición química de aguas subterráneas, termales, minerales, de precipitación y fluviales asociadas a distintos tipos de litología. Se indica, como referencia, la composición media del agua del mar.

Fuente: elaboración propia

Las aguas ricas en hierro suelen tener como características distintivas su sabor (aguas ferruginosas) así como la abundante precipitación de oxihidróxidos de Fe coloidales (geles) o minerales (ferrihidrita, etc.). El antiguo balneario de O Incio constituye un buen ejemplo de estas aguas.

### Rocas carbonatadas (calizas y dolomías)

Las rocas carbonatadas desarrollan con gran frecuencia una porosidad secundaria producto de su disolución en favor de discontinuidades (planos de estratificación, diaclasas, etc.). Sus tipologías más frecuen-

tes son las calizas y las dolomías, ambas representadas en Galicia en la formación de Vegadeo y en algunas unidades del grupo de Cándana. En ambos casos, la impronta que dejan en las aguas subterráneas es muy característica: aguas bicarbonatadas cálcicas o cálcico-magnésicas.

### **Rocas y sedimentos terrígenos**

La mayoría de estas litologías tiene un origen detrítico, es decir, producto de la meteorización, transporte y sedimentación de fragmentos de roca, minerales resistentes, minerales de la arcilla, así como restos orgánicos. Estos materiales, a menudo, no están litificados y su granulometría puede ser muy variable (grava, arena, limo y arcilla). Su porosidad es, típicamente, intergranular y puede verse reducida durante la diagénesis.

Desde el punto de vista hidrodinámico, los sedimentos detríticos gruesos (por ejemplo, gravas) suelen presentar una permeabilidad muy elevada. Por el contrario, las arcillas, pese a presentar una gran porosidad, tienen una permeabilidad muy pequeña.

A diferencia de otros tipos litológicos, en las rocas detríticas con predominancia de materiales arcillosos, los procesos de intercambio iónico juegan un papel muy destacado en términos de control de la composición química de las aguas. Por otro lado, la evolución hidroquímica de las aguas en sedimentos detrítico-arcillosos depende también de la mineralogía de la roca. De este modo, los sedimentos margosos dan lugar a pautas de evolución similares a las de las rocas carbonatadas, mientras que en las arcosas serán similares a las de los granitoides. Por último, la composición de las aguas subterráneas en formaciones arenosas ricas en cuarzo es muy parecida a las de las aguas de lluvia.

En Galicia, la ausencia de depósitos evaporíticos, así como la preponderancia de sedimentos detríticos siliciclásticos, hace que,

en general, las aguas subterráneas estén relativamente poco mineralizadas y que su composición sea de tipo bicarbonatado sódico-cálcico.

Además de las pautas composicionales principales descritas para las aguas subterráneas de Galicia, existen en estas otros aspectos destacables que merecen una cierta atención: la radiactividad natural de las aguas y las anomalías de temperatura que generan un carácter termal. Como vamos a tratar el termalismo, por su importancia, en un punto diferenciado, procederemos a comentar brevemente la cuestión de la radiactividad natural de las aguas subterráneas.

### **Radiactividad natural de las aguas subterráneas en Galicia**

Todas las aguas naturales, ya sean superficiales o subterráneas, contienen una cierta cantidad de elementos radiactivos. Una parte de la concentración de radioisótopos de las aguas naturales tiene un origen natural aunque, bajo determinadas circunstancias, también puede existir un aporte antrópico (por ejemplo, la entrada de tritio en el ciclo hidrológico como resultado de los ensayos atmosféricos de ingenios nucleares y term nucleares, durante las décadas de los años cincuenta y sesenta del siglo pasado).

Cuando se estudian las fuentes de radiactividad natural en las aguas subterráneas es conveniente separar la radiactividad asociada a la presencia de radón (un gas de origen natural, más o menos frecuente en las aguas subterráneas y que es liberado en los puntos de surgencia), de la debida a radioisótopos disueltos (en general, especies iónicas cuya concentración, en ausencia de procesos físicos como la mezcla, sorción o precipitación, no tiene por qué variar al producirse la descarga).

El radón es un gas radiactivo natural. Como miembro del grupo VIII de la tabla periódica, es químicamente inerte. En la naturale-

za puede estar presente en la forma de tres isótopos distintos, los cuales derivan de tres cadenas de desintegración diferentes ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{235}\text{U}$ ). El radón es importante en el contexto de las aguas potables debido a que: a) el torio y el uranio presentan concentraciones importantes en algunas rocas (por ejemplo, granitoides) a través de las cuales discurren las aguas subterráneas; b) tiene una alta solubilidad en el agua. Al igual que otros gases, la solubilidad disminuye al aumentar la temperatura (51 vol. % a 0 °C y 13 vol. % a 60 °C).

A diferencia de los radioisótopos disueltos, el radón no tiene por qué tener un origen profundo y, por lo tanto, restringido al dominio de las aguas minerales y termales (Remy y Lemaitre, 1990). No es infrecuente que su fuente sea muy cercana a la de los puntos de surgencia.

El radón de las aguas subterráneas puede tener dos orígenes distintos:

- La desintegración radiactiva de radio disuelto ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{224}\text{Ra}$  y  $^{223}\text{Ra}$ ), siendo este elemento su inmediato precursor en las correspondientes cadenas de desintegración.
- Su liberación directa a partir de minerales de la matriz rocosa que contienen miembros de la cadena de desintegración U/Th. Muchas aguas, en realidad, presentan una concentración de radón muy por encima de la que cabría esperar de la mera desintegración del radio disuelto que, por otro lado, es muy poco soluble.

De acuerdo con ello, es razonable pensar que la mayoría del radón presente en aguas subterráneas ha sido producido a partir de los granos minerales de los acuíferos o de las paredes de fracturas.

La concentración de radón en el agua subterránea depende de seis factores (Nelson *et al.*, 1983; Michel, 1990; Ball *et al.*, 1991; Albu *et al.*, 1997):

- I. Factores hidrodinámicos (por ejemplo, la velocidad de flujo).
- II. Factores geométricos. Se cree que la concentración de equilibrio de radón es inversamente proporcional a la apertura de las fracturas conductoras.
- III. El contenido de uranio (o, en términos estrictos, de radio) de la matriz del acuífero (roca o sedimento).
- IV. La mineralogía de las fases que contienen uranio y radio (cuya solubilidad puede ser variable).
- V. La posibilidad de degasificación de radón antes de que llegue al punto de descarga o captación.
- VI. La concentración de radio disuelto en el agua.

Como ya hemos señalado, cuando se estudia la radiactividad natural en las aguas subterráneas, además de considerar el papel del radón, debemos tener presentes los radioisótopos disueltos. Un caso particular de radioisótopo de interés es el del tritio ( $^3\text{H}$ ), puesto que su actividad está regulada para las aguas potables. Debe tenerse en cuenta que el  $^3\text{H}$  se produce en pequeñas cantidades a partir del  $^{14}\text{N}$  como resultado de su interacción con los rayos cósmicos. No obstante, las aguas subterráneas pueden mostrar concentraciones de tritio que exceden el valor natural, lo cual ha servido durante muchos años para determinar tiempos de residencia del agua en el medio subterráneo.

Una manera de valorar de forma agregada la radiactividad de las aguas es a través de las actividades alfa y beta totales ( $\alpha_{\text{total}}$  y  $\beta_{\text{total}}$ ). Cada una de ellas contabiliza las contribuciones de todos los emisores alfa y beta presentes en el agua. Cuando se superan ciertos límites, es conveniente proceder al análisis específico de los radioisótopos asociados a estas.

Respecto a la radiactividad de las aguas subterráneas en Galicia podemos tomar como referencia regional el trabajo realizado en los pasados años por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) y la Empresa Nacional del Uranio (ENUSA), que han elaborado el mapa radiométrico de la península a escala 1:1.000.000 dentro del proyecto denominado MARNA (Mapa Radiométrico Nacional). El resultado de los valores medios de tasas de exposición gamma natural correspondientes a cada una de las provincias de la España peninsular muestran que los valores más altos corresponden a las provincias de Madrid, Cáceres, Lugo, Ourense y Pontevedra (CSN, 2000).

Debe destacarse la concordancia entre las anomalías de radiación gamma natural identificadas en el Proyecto MARNA y las altas actividades de radón de las aguas termales del sector sur de Galicia, aunque las anomalías de radiación en este territorio responden a pautas geológicas, como ocurre también en el caso de las provincias de Madrid y Cáceres.

### 1.2.2. Singularidad de las aguas subterráneas de Galicia: hidrotermalismo

Galicia es un territorio rico en manifestaciones termales. Muchas de ellas son conocidas desde tiempos remotos y, en la actualidad, constituyen una fuente de riqueza, al haberse desarrollado una importante red de instalaciones balnearias que combinan el aspecto lúdico con el terapéutico.

La mayor concentración de manifestaciones termales de la península se corresponde con los territorios de Galicia y Cataluña. Lo mismo sucede con la temperatura máxima de sus aguas.

La determinación del origen del termalismo de las aguas naturales ha sido objeto de interés desde la más remota antigüedad. Con el desarrollo de la geoquímica isotópica, se evidenció el hecho de que, aun en contextos de magmatismo activo (volcanismo actual o reciente), el origen del agua de los sistemas geotérmicos está estrechamente ligado al ciclo hidrológico superficial a través de la precipitación (Craig, 1963; Hoefs, 1997). De forma resumida, el modelo conceptual simplificado de estos sistemas considera que el agua de lluvia se infiltra en el terreno y se integra en un sistema de flujo subterráneo. Como resultado de su proximidad respecto a cuerpos ígneos someros, el agua se calienta y reacciona con las rocas que atraviesa. Cuando, de acuerdo con las características estructurales del terreno, las aguas calientes encuentran caminos de flujo rápido hacia la superficie (por ejemplo, a través de fracturas o zonas de fractura altamente transmisivas), estas pueden descargar a una temperatura apreciable.

Hoy en día sabemos que, además de la contribución meteórica, la fuente ígnea no es despreciable en algunos sistemas geotermales (Giggenbach, 1992). Por otro lado, existen muchas regiones de la Tierra en las que, como en Galicia, no existen evidencias de magmatismo activo<sup>2</sup>, aunque el hidrotermalismo puede ser notorio. No obstante, la explicación de la anómala presencia de agua caliente cerca de la superficie requiere comentar la distribución de calor dentro de la corteza.

Es un hecho conocido que, a medida que nos alejamos de la superficie, a partir de una cierta profundidad, las rocas dejan de experimentar las oscilaciones térmicas producto

<sup>2</sup> Una buena parte del sustrato gallego está conformado por rocas ígneas, motivo por el cual tiende a establecerse una errónea relación entre la temperatura de las aguas y la presencia de estas litologías. Esta relación es meramente coyuntural en la medida en que el magmatismo que representan estas rocas ígneas tuvo lugar hace centenares de millones de años, tiempo más que suficiente como para disipar la energía calorífica asociada a su cristalización. No obstante, no debemos olvidar que muchas rocas ígneas incorporan, en mayor o menor proporción, elementos radiactivos que, durante su desintegración, liberan una cantidad de calor susceptible de incrementar el gradiente geotérmico.

de la dinámica climática. A partir de esta profundidad, la variación de temperatura al profundizar en la corteza experimenta una pauta que es descrita a través del denominado *gradiente geotérmico*. De ese modo, suele entenderse que el *gradiente geotérmico normal* sería igual a un aumento de 30 a 33 °C por cada kilómetro de profundidad. Sin embargo, esto es una simplificación de la realidad, ya que el valor del *gradiente térmico*, lejos de ser constante, varía en distintos puntos de la corteza debido a causas físicas (desintegración radiactiva) y tectónicas (adelgazamiento o engrosamiento cortical).

El *gradiente geotérmico* permite entender cómo las aguas del ciclo hidrológico, al infiltrarse a través de la corteza, aumentan de temperatura. Si, por motivos estructurales, se produce el retorno del agua a la superficie de forma rápida, es posible que en los puntos de descarga se manifiesten temperaturas anómalamente altas. De igual modo, en función del tiempo de residencia dentro de la corteza, las reacciones con los distintos tipos de roca que encuentre en su trayectoria o de eventuales fenómenos de mezcla con agua de sistemas más someros, es posible que las aguas manifiesten una gran diversidad química y térmica. Esto justifica la variabilidad

que muestran muchos emplazamientos termales con surgencias múltiples (figura 9).

La temperatura que podemos medir en las aguas termales en sus puntos de surgencia no suele coincidir con la correspondiente a la máxima profundidad a la que se calientan. Esto se debe a una serie de procesos que, en conjunto, provocan su enfriamiento. Los más importantes son: a) la ebullición adiabática (es decir, la separación física de una fase vapor sin intercambio de calor con la roca); b) la disipación de calor por conducción térmica hacia la roca; c) la mezcla con aguas frías superficiales; y d) por combinación de los tres procesos anteriores (Delgado *et al.*, 2007).

Los análisis químicos de las aguas termales proporcionan información útil a la hora de discriminar entre dichos procesos. De ese modo, las aguas que ascienden rápida y directamente (con un nulo o débil enfriamiento conductivo) a partir de acuíferos profundos suelen presentar una composición química que refleja el equilibrio agua-roca a la temperatura del acuífero. Sin embargo, en las aguas que ascienden despacio o de forma indirecta hasta la superficie es previsible su enfriamiento por conducción, sobre todo

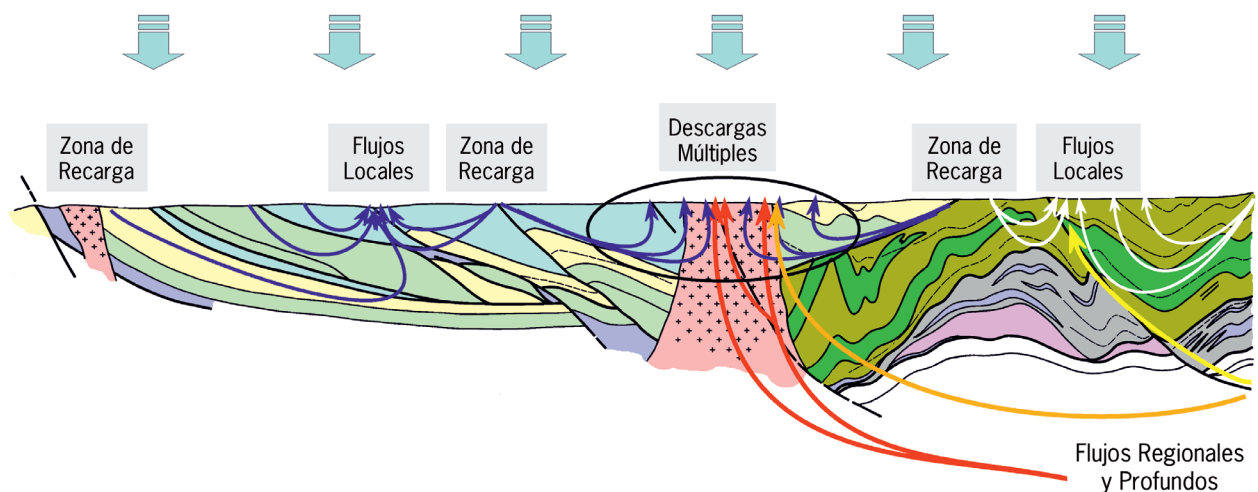


Figura 9. Corte geológico esquemático de las distintas escalas de flujo subterráneo a través de un macizo cristalino deformado y constituido por múltiples tipos de litologías

Fuente: elaboración propia



si, antes de llegar al exterior, discurre horizontalmente una distancia suficiente. Como resultado, podemos encontrar alineaciones de manantiales cuya composición química puede ser muy parecida pero que, en cambio, muestren notables cambios de temperatura. Por otro lado, cuando el agua ascendente caliente se enfría como resultado de su mezcla con aguas superficiales, varias fuentes próximas pueden ser distintas tanto química como térmicamente. En la investigación geotérmica, suele ser objeto de especial atención la determinación de la temperatura de los acuíferos termales, a menudo referidas como reservorios geotérmicos. D'Amore (1991) presenta un extenso documento relativo a la aplicación de técnicas geoquímicas a la estimación de las temperaturas de los reservorios geotermales.

### 1.2.3. Afloramientos hidrogeológicos singulares en Galicia

La realidad hidrogeológica de Galicia está dominada por el comportamiento de los acuíferos superficiales que hemos descrito en el punto anterior. No obstante, existen afloramientos singulares de aguas con características propias de aguas minerales (aquellas que presentan especiales características composicionales) y termales (aquellas cuya elevada temperatura de surgencia les confiere singularidad).

En un estudio publicado hace ya algunos años por la Consellería de Industria y Comercio (Xunta de Galicia, 1995) se indica que, en el momento de su redacción, existían un total de 314 puntos de aguas minerales y termales, de los cuales 29 fueron catalogados como balnearios y casas de baño en funcionamiento.

Souto (1996) realizó una pormenorizada exposición de los aspectos históricos del termalismo gallego, presentando una reducida información relativa a las características fisi-

coquímicas de sus aguas y a otros aspectos relacionados. Por ello, en esta sección nos concentraremos en resumir los trabajos publicados más relevantes en relación con el hidrotermalismo de la comunidad gallega.

La figura 10 muestra la localización de los principales manantiales y fuentes termales del territorio gallego. En ella se puede observar una mayor concentración de indicios termales en la provincia de Ourense, a las que cabría añadir otras próximas, en territorio portugués, como son las de Vilarelho da Raia, Chaves, Pedras Salgadas, Vidago, São Lourenço, Carlão y Caldas do Moledo (Marques *et al.*, 2000a y b; Marques *et al.*, 2001; Marques *et al.*, 2003).



Figura 10. Principales balnearios y fuentes termales de Galicia. Los colores rojo y azul indican su emplazamiento en un sustrato ígneo o metamórfico, respectivamente.

Fuente: elaboración propia

Una inspección preliminar de las aguas de los distintos balnearios gallegos permite establecer que, con la excepción del balneario de A Toxa (en menor medida el de Arteixo y los manantiales Troncoso y Estrella de Mondariz), la mayoría de sus aguas son relativamente diluidas. Esto podría implicar, *a priori*, un tiempo de residencia en el sustrato relati-

vamente corto. Asimismo, las aguas son principalmente de tipo bicarbonatado-sódicas (incluyendo las de Mondariz), con notables excepciones clorurado-sódicas (A Toxa, Arteixo y los manantiales y fuentes de Caldas de Reis) y bicarbonatado-cálcicas (O Incio). Este último, si bien cuenta con instalaciones balnearias inactivas, no es propiamente un sistema termal, sino una fuente ferruginosa que adquiere su composición tras transitar a no demasiada profundidad a través de pizarras ampelíticas.

Las aguas del balneario de A Toxa son singulares en cuanto a su elevada concentración<sup>3</sup>, su temperatura moderada (de 40 a 47 °C) y una facies marcadamente clorurado-sódica. Estas características han hecho pensar durante bastante tiempo y con razón, en la vinculación en origen del agua marina con las surgencias termales de A Toxa.

La figura 11 muestra un diagrama triangular de los aniones más representativos de las aguas termales típicas. Dicho diagrama, propuesto por Giggenbach y Goguel (1989), fue pensado originalmente para sistemas magmático-hidrotermales pero, con el tiempo, se ha ido empleando de forma más o menos generalizada para realizar una clasificación preliminar de las aguas termales. De modo resumido, el diagrama divide las aguas de acuerdo con sus contenidos relativos de cloruro, sulfato y bicarbonato.

Podemos observar que la mayoría de las aguas termales se proyectan en la sección inferior derecha del diagrama, dentro del dominio denominado de las *aguas periféricas*. De acuerdo con Giggenbach (1988, 1997), este campo se caracterizaría por la existencia de aguas que, aun habiendo interactuado con el sustrato rocoso, no habrían alcanzado el equilibrio químico con él. Por otro lado, la zona enmarcada en el

extremo rico en cloruro del diagrama sería el dominio de las llamadas *aguas maduras*, es decir, aquellas que han interactuado con las rocas suficiente tiempo como para haberse aproximado significativamente al equilibrio químico con estas. Podemos observar que, dentro del campo de las aguas maduras, se localizan varias muestras de agua, singularmente las de los balnearios de Arteixo, Caldas de Reis (Dávila y Acuña) y A Toxa (Juncosa *et al.*, 2011).

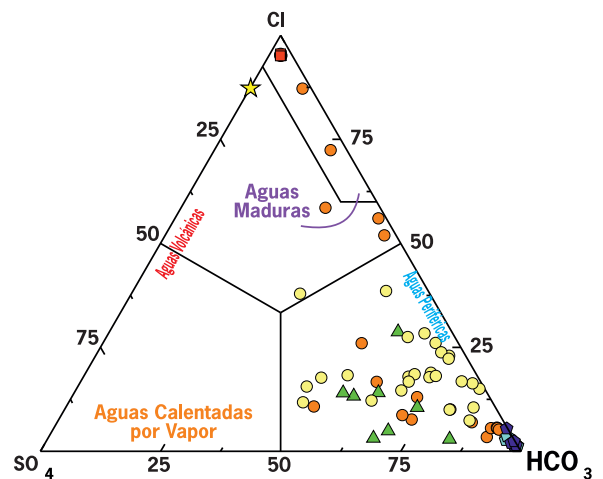


Figura 11. Diagrama  $\text{ClHCO}_3\text{-SO}_4$  (en mg/l) de Giggenbach y Goguel (1989) de los balnearios y fuentes termales de Galicia y norte de Portugal. Sustrato ígneo: círculos naranja (Galicia) y amarillos (norte de Portugal); sustrato metamórfico (triángulos verdes); aguas carbogaseosas: pentágonos azul oscuro (Verín y Mondariz) y claro (norte de Portugal); aguas del balneario de A Toxa: cuadrados rojos.

Fuente: elaboración propia

En el caso particular de la cuenca del río Mandeo existe un antiguo balneario, hoy en día destruido, en la zona conocida como Fonte de Bocelo, próxima a Betanzos, en Chelo. Las aguas son frías o hipotermas (~15 °C) y de pequeño caudal (0,02-0,008 l/s), y se catalogan como sulfurosas-SO<sub>4</sub> con bicarbonato y sodio, de mineralización muy débil y dureza muy blanda (conductividad específica ~292 μS/cm). Las aguas se utilizaban como bebida, para tratamientos de trastornos de hígado, y baños para tratamientos de piel y reuma.

<sup>3</sup> El total de sólidos disueltos es cercano a los 30 g/l, valor que es próximo a los 34,5 g/l de media del océano.

### 1.3. Influencia antrópica sobre la calidad de las aguas subterráneas

La influencia antrópica sobre la calidad de las aguas subterráneas significa cambios composicionales debidos a la introducción (voluntaria o involuntaria) por parte de la actividad humana de sustancias químicas naturales o de síntesis en los ciclos biogeoquímicos de las aguas subterráneas. Por esta razón, hemos considerado que, a pesar de ser producto de la actividad antrópica, las referencias a los procesos de cambio de la calidad (contaminantes, por lo general) explicarían mejor algunas cuestiones del ciclo biogeoquímico de las aguas subterráneas.

En el caso particular de las aguas subterráneas, el impacto de la agricultura sobre ellas es menos visible pero tan insidioso como el de la actividad industrial, dado que muchos de los fertilizantes, pesticidas y herbicidas empleados para mejorar la productividad de las cosechas tienden a quedar acumulados en el medio subterráneo, y son susceptibles de afectar a los ecosistemas a lo largo de periodos de tiempo muy prolongados.

La vulnerabilidad de los acuíferos frente a la contaminación depende de distintos factores. Entre ellos podemos citar los siguientes:

- La capacidad de la zona saturada para recibir y almacenar contaminantes.
- La capacidad de atenuación de los materiales geológicos situados por encima del acuífero. Esta depende, a su vez, de la capacidad de retención física del medio geológico, así como de la potencial reactividad de los contaminantes.
- El tipo de contaminante en términos de su movilidad relativa y su capacidad para ser diluido.
- La concentración y estado de agregación de la carga contaminante (líquida, gaseosa, sólida) al llegar al medio receptor.

La interacción entre todos estos factores condiciona el tiempo de residencia del contaminante en la zona no saturada, su tiempo de llegada a la zona saturada, así como el grado de atenuación y retención con la que llegará a esta. En teoría, el análisis de vulnerabilidad nos permite calcular, en función de la carga contaminante, su concentración en un punto concreto del sistema y para un tiempo determinado. A su vez, la carga contaminante puede ser descrita de acuerdo con las características propias de cada contaminante (por ejemplo, persistencia o movilidad), las características hidrodinámicas del medio receptor, la intensidad con que entra en este (concentración, área de recarga y duración del aporte), etc.

#### 1.3.1. Control de la calidad química de las aguas subterráneas

La Directiva Marco del Agua (DMA) establece, en su artículo 8, que los Estados miembros deben diseñar programas de control que proporcionen información para la valoración de las masas de agua con el fin de obtener una visión general de su estado dentro del ámbito estudiado. En el caso de las aguas subterráneas, estos programas deben incluir el control cuantitativo de su estado químico y ser diseñados conforme a lo prescrito por el anexo V de la propia DMA.

A partir de los años setenta, el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) implantó de forma progresiva la Red de Observación de la Calidad de Aguas Subterráneas (ROCAS). Como complemento a esta red, el IGME puso en funcionamiento la Red de Observación de Intrusión (ROI), a fin de observar la evolución de la intrusión marina en los acuíferos costeros. No obstante, debido a la dispersión que existe en cuanto a su control, así como la adaptación a la DMA, en el año 2000 se realizó una redefinición de la Red Oficial de Aguas Subterráneas integrando redes de control preexistentes, gestionadas por diversos organismos, y determi-

nando nuevos puntos de control dependientes de las distintas confederaciones hidrográficas.

En Galicia no existe una red integrada de caracterización y seguimiento de la calidad de las aguas subterráneas, lo cual supone que no se están cumpliendo las exigencias de la Directiva 91/676/CEE (DOCE 31-12-1991) de protección de las aguas contra la contaminación producida, por ejemplo, por nitratos (o Directiva de Nitratos).

### 1.3.2. Tipos de contaminación de las aguas subterráneas de Galicia

Las dos causas fundamentales de contaminación de las aguas subterráneas en Galicia son las actividades agrícolas y ganaderas, junto con los efluentes domésticos. En las últimas décadas las actividades agropecuarias han sufrido importantes transformaciones: se han intensificado las actividades agrícolas y se ha pasado de las explotaciones ganaderas extensivas —ligadas al suelo— a las intensivas o de establo. Este cambio ha generado indudables avances socioeconómicos aunque, como contrapartida, también ha generado graves problemas ambientales. Una buena parte de ellos deriva de la contaminación difusa que generan tanto las actividades agrícolas como los residuos generados por las prácticas de ganadería intensiva. Agricultura y ganadería constituyen, pues, las principales fuentes de contaminación difusa.

En los núcleos de población pequeños, las aguas residuales domésticas suelen verterse sin tratamiento previo a los cauces naturales o al subsuelo. Esto conduce a un aporte muy significativo de materia orgánica soluble, nitrógeno orgánico y amoniacal, nitratos y nitritos, fósforo, potasio, cloruros, boro, metales, ácidos y bases, así como de contaminación bacteriológica (Rodríguez *et al.*, 2005).

Durante muchos años se ha considerado que la principal fuente de contaminación de

las aguas subterráneas en Galicia era la relacionada con los compuestos nitrogenados (fertilización con purines). Es evidente que la actividad agropecuaria tiene una incidencia destacada sobre acuíferos someros, donde la llegada incontrolada de estos compuestos ha dado lugar a la afección de un sinnúmero de manantiales. Sin embargo, estudios más recientes han evidenciado que otros contaminantes (por ejemplo, los bacterianos, fitosanitarios, plaguicidas, abonos nitrogenados y fosfatados, etc.) tienen una importante presencia en las aguas subterráneas naturales de Galicia. Asimismo, la existencia de vertederos de distintos tipos de materiales (en particular, residuos sólidos urbanos), así como de puntos de vertido incontrolados, constituye otro foco de problemas para la calidad natural de las aguas. A todo ello cabe añadir afecciones asociadas a las concentraciones urbanas, las industriales y, en determinadas zonas costeras (por ejemplo, Pontevedra), la problemática de la intrusión marina.

## 2. HIDROGEOLOGÍA DE GALICIA: MEDIO SOCIOECONÓMICO

### 2.1. Marco normativo

Las aguas subterráneas son parte integrante del ciclo hidrológico y, por lo tanto, en aplicación de la vigente legislación y los reglamentos que la desarrollan, pertenecen al dominio público hidráulico. De este modo, el administrador de la demarcación Galicia-Costa (el organismo autónomo de Aguas de Galicia) tiene encomendada su gestión excepto para aquellos ámbitos de actuación propios de la ley de Minas y sus decretos de desarrollo (aguas minerales y termales).

Debido, como hemos mencionado, a que la aparición de las aguas minerales y termales de Galicia es geográficamente puntual, la planificación y gestión de las aguas minerales y termales de Galicia no se realiza bajo un criterio territorial, sino mediante un conjunto

de criterios de gestión (véase la tabla 2, de características exigidas a las aguas minerales y termales de Galicia). Sin embargo, hay que destacar que las aguas minerales deben contar, al menos teóricamente, con un perí-

metro de protección. Este perímetro es una poligonal que engloba una superficie en la que se limitan las actividades que deben realizarse, buscando con ello la protección de la calidad de las aguas subterráneas.

Tabla 2. Clasificación de las aguas minerales, termales y de manantial, de acuerdo con la Ley 5/1995 y el Decreto 402/1996 de la Comunidad Autónoma de Galicia

REGULACIÓN DE LAS AGUAS MINERALES, TERMALES, DE MANANTIAL Y DE LOS ESTABLECIMIENTOS BALNEARIOS EN GALICIA					
TIPO	Aguas minerales			Aguas termales	Aguas de manantial
	Aguas minero-medicinales	Aguas minero-industriales	Aguas minero-naturales		
<b>DEFINICIÓN</b>	Las alumbradas natural o artificialmente y que por sus características y cualidades sean declaradas de utilidad pública y sean aptas para tratamientos terapéuticos.	Las que permiten el aprovechamiento racional de las sustancias que contengan, entendiéndose incluidas las aguas tomadas del mar a estos efectos.	Aquellas bacteriológicamente sanas que tengan su origen en un estrato o depósito subterráneo y que broten de un manantial en uno o varios puntos de alumbramiento naturales o perforados.	Aquellas aguas cuya temperatura de surgencia sea superior, al menos en cuatro grados centígrados, a la media anual del lugar en que alumbren.	Aquellas de origen subterráneo que emergen espontáneamente en la superficie de la tierra o se captan mediante labores practicadas al efecto, con las características naturales de pureza que permiten su consumo.
<b>CARACTERÍSTICAS</b>			Pueden distinguirse claramente de las restantes aguas potables por su naturaleza y pureza original; están caracterizadas por su contenido en minerales, oligoelementos y, en ocasiones, por determinados efectos favorables.		
<b>NOTAS</b>	Solo podrán ser aprovechadas para usos terapéuticos en instalaciones balnearias situadas en las áreas de emergencia. También podrán envasarse para su consumo siempre que cumplan los requisitos señalados en los reales decretos 1074/2002 y 1744/2003.			Aquellas aguas cuya temperatura de surgencia sea superior, al menos en cuatro grados centígrados, a la media anual del lugar donde alumbren y sean declaradas de utilidad pública, y sean aptas para usos terapéuticos en instalaciones balnearias situadas en las áreas de emergencia.	

## 2.2. Funciones de uso para abastecimiento, producción y servicios

Los principales usos del agua subterránea en Galicia son de tipo doméstico, agropecuario, industrial, así como para el abastecimiento de pequeños núcleos rurales (Fumega y Román, 1996). Cerca de 1.500.000 personas viven en Galicia en núcleos de menos de 500 habitantes, lo que ha hecho proliferar el uso doméstico de las aguas subterráneas mediante perforaciones con bajos caudales de explotación. Una evaluación preliminar de pozos y manantiales realizada por el IGME en 1982 indica que estos sumarían no menos de 300.000 pequeños aprovechamientos, de los cuales solo cerca del 10 % estarían legalizados.

El abastecimiento principal de los núcleos urbanos más poblados se realiza con aguas superficiales (Sánchez-Guzmán, 1994). El uso del agua subterránea para fines ganaderos es también importante y es notable el hecho de que, incluso en aldeas con redes de distribución, se usan pozos para el ganado, ya que este soporta mal el agua clorada. Se puede estimar el consumo por unidad tipo de abastecimiento autónomo en 50 m<sup>3</sup>/año para abastecimiento humano y 150 m<sup>3</sup>/año para usos agropecuarios.

En Galicia, el uso de agua subterránea para abastecimiento de poblaciones importantes es muy bajo, aunque debe destacarse que, hasta hace unas décadas, el abastecimiento de algunas ciudades importantes como Vigo, Pontevedra, o Santiago se realizaba, principalmente, a partir de minas y manantiales (MOPTMA, 1978; MOPU, 1984). En la actualidad, estos manantiales tienen una función complementaria.

### 2.2.1. Abastecimiento doméstico

En las zonas rurales, el abastecimiento típico a viviendas aisladas se realiza mediante

un sistema de tubería y arqueta conectada al manantial. En el caso de los núcleos más grandes (200 a 400 casas), no es rara la interconexión de pozos mediante drenes horizontales o galerías. Los pozos tradicionales excavados en terrenos blandos («de barrena») suelen tener diámetros de entre 1 y 2 m, y alcanzan profundidades que oscilan entre los 5 y 15 m. Los caudales obtenidos con esta técnica son, normalmente, muy pequeños (aproximadamente 1 l/s) y explotan las aguas más someras, por lo que son fácilmente contaminables. Además, en época de estiaje, no es raro que queden secos. La tendencia de los últimos años ha sido perforar (mediante rotopercusión y martillo en fondo) pozos más profundos (20-50 m) y con diámetros menores (100 mm). Esto permite obtener caudales mayores (de 1.000 y 1.500 l/h) y reducir la vulnerabilidad frente a la contaminación y el estiaje. Por último, la excavación de galerías de captación de aguas subterráneas para pequeños núcleos urbanos suelen proporcionar unos rendimientos de entre 2 y 3 l/s. Contrasta con esta situación la percepción generalizada de que, en Galicia, los recursos de agua subterránea son prácticamente inexistentes.

En el caso de las cuencas del río Mandeo y Mendo se han localizado unos 150 pozos, de los cuales hay en mayor cuantía los de barrena con respecto a los artesanos, con profundidades que oscilan entre los 12 y los 45 m. Con respecto a los manantiales con surgencia natural, son de escasa entidad, procediendo su origen del agua sub-superficial epidérmica (y en algunos casos hipodérmica), cuyo recorrido es muy corto y, en consecuencia, de poca profundidad, asociada a la alteración del material geológico (regolito). En la tabla 3 se detallan, por municipios, el número de captaciones (pozos) y manantiales localizados en la cuenca.

Tabla 3. Inventario de pozos y manantiales (EPTISA, 2010)

MUNICIPIO	MANANTIALES	POZOS	POZOS DE BARRENA		POZOS ARTESIANOS	
			N.º	Profundidad	N.º	Profundidad
Aranga	1	23	17	41	6	8
Bergondo	1	12	6	32	6	14
Betanzos	0	13	7	24	6	12
Cesuras	1	16	15	37	1	10
Coirós/Aranga	1	15	9	45	6	10
Curtis	2	13	11	47	2	11
Irixoa	0	13	9	45	4	9
Oza dos Ríos	1	18	16	45	2	15
Paderne	1	15	7	40	8	9
Sobrado	0	11	6	31	5	12

### 2.2.2. Abastecimiento urbano

El abastecimiento de agua para las grandes urbes ha evolucionado a lo largo del tiempo (Xunta de Galicia, 1998). Si bien muchos de los actuales grandes núcleos de población (por ejemplo, Santiago de Compostela, A Coruña, Vigo, Pontevedra, Ourense, Ferrol, Lugo) comenzaron como pequeñas poblaciones, el desarrollo demográfico a partir de los años setenta determinó la necesidad de planificar y construir grandes obras de abastecimiento y saneamiento con las que satisfacer la demanda (MOPTMA, 1978; MOPU, 1984). En consecuencia, mientras que la explotación local de las aguas subterráneas ha constituido la principal fuente de abastecimiento en el medio rural, en las zonas más densamente pobladas han sido las aguas superficiales las que han sido primadas con la construcción de embalses y conducciones

### 2.2.3. Uso para producción (agua embotellada) y servicios (balnearios)

Baeza *et al.* (2001) publicaron un interesante «atlas» de las aguas minerales en España, en el que se aportaron datos relativos a Galicia. En dicha publicación se inventaría un total de 144 captaciones de agua mineral, de las

cuales 18 serían balnearios, 10 plantas de envasado, 59 captaciones inactivas con fecha de declaración de utilidad pública y otras 57 estarían escasamente documentadas.

En un estudio reciente, Mejide *et al.* (2009) han analizado y catalogado 82 manantiales de 42 balnearios con declaración mineralo-medicinal en toda Galicia, tanto desde el punto de vista de utilidad sanitaria como desde el punto de vista hidrogeológico de sus captaciones e hidroquímico de sus aguas.

En cuanto a las aguas minerales embotelladas en Galicia, estas son de tipo bicarbonatado-sódico, con las excepciones de las aguas de la Fonte do Bispo, Fontoira, que son bicarbonatado-cálcicas; las de Sanxines y Agua Sana, que son clorurado-sódicas y muy diluidas, presentan una clara analogía con la precipitación próxima a la costa por lo que el tiempo de residencia de estas aguas en el sistema acuífero se presume muy corto.

### 2.2.4. Función de uso (potencial) hidrogeotérmico o geotérmico

Aunque pueda parecer sorprendente, pese al indudable interés de las aguas termales y la geotermia en Galicia, el estado del cono-

cimiento del potencial geotermal de nuestro territorio permanece esencialmente inexplorado. Esta situación contrasta con la de nuestro país vecino, Portugal (Carvalho, 1996).

El Instituto Geológico y Minero de España publicó en 1980 (IGME, 1980) un estudio preliminar relativo al potencial geotérmico de Galicia. Años más tarde, Cuchí (2000) y Sánchez-Guzmán (2005) han publicado actualizaciones que poco o nada incrementan ese conocimiento. De acuerdo con estos estudios, España presenta tres tipos de reservorios geotermales: a) almacenamientos

de baja entalpía ( $T < 100$  °C); b) almacenamientos de media entalpía ( $100 < T < 150$  °C), y c) almacenamientos de alta entalpía y en roca seca, restringidos al dominio insular canario. Dentro de las dos primeras categorías, Galicia es susceptible de albergar almacenamientos de baja y media entalpía en las provincias de Pontevedra y Ourense, si bien los datos que se aportan son solo suficientes para una evaluación muy preliminar. Michard y Beucaire (1993) han realizado un estudio de una selección de 21 manantiales de aguas termales asociadas a litologías graníticas en Galicia.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y DOCUMENTALES

- ALBU, M.; BANKS, D. y NASH, H. *Mineral and Thermal Groundwater Resources*. Chapman and Hall, Londres, 447 p., 1997.
- APPELO, C. A. J. y POSTMA, D. *Geochemistry, Groundwater, and Pollution*, ed. Balkema, 536 p., 1992.
- BAEZA, J.; LÓPEZ GETA, J. y RAMÍREZ, A. (eds.). *Las aguas minerales en España*, Instituto Geológico y Minero de España, 454 p., 2001.
- BALL, T. K.; CAMERON, D. G.; COLMAN, T. B. y ROBERTS, P. D. «Behaviour of radon in the geological environment: A review», *Quarterly Journal of Engineering Geology* 24, Londres, p. 169-182, 1991.
- BANKS, D. y ROBINS, N. *An Introduction to Groundwater in Crystalline Bedrock*, Norges Geologiske Undersøkelse, Trondheim, 68 p., 2002.
- CARVALHO, J. M. «Mineral water exploration and exploitation at the Portuguese Hercynian Massif», *Environmental Geology* 27, p. 252-258, 1996.
- CHEBOTAREV, I. I. «Metamorphism of natural waters in the crust of weathering» (1); *Geochimica et Cosmochimica Acta* 8, p. 22-48, 1955.
- CRAIG, H. «The isotopic geochemistry of water and carbon in geothermal areas», en TONGIORGI, E. (ed.). *Nuclear Geology in Geothermal Areas*, Spoleto, p. 15-73, 1963.
- CSN. *Proyecto Marna: Mapa de Radiación Gamma Natural*, Consejo de Seguridad Nuclear, Colección Informes Técnicos 10/2000, 140 p., 2000.
- CUCHÍ, J. A.; BAEZA, J. y GARCÍA DE LA NOCEDA, C. «Overview of hydrogeothermics in Spain», *Environmental Geology* 39(5), p. 482-487, 2000.
- D'AMORE, F. *Application of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development*, United Nations Institute for Training and Research, UNITAR, Man/10, 408 p., 1991.
- DAVIS, S. N. y DE WIEST, R. J. M. *Hydrogeology*, John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, p. 96-128, 1966.
- DELGADO, J.; JUNCOSA, R.; MEIJIDE, R.; MOHAMED, M.; FERNÁNDEZ, S. y ÁLVAREZ, M. «Influencia hidrogeológica sobre el quimismo de las aguas mineromedicinales en Galicia», *Revista de Salud Ambiental*, p. 58-59, A Coruña, 2009.
- DELGADO, J.; JUNCOSA, R.; MEIJIDE, R.; VÁZQUEZ, A. y BARRIENTOS, V. *Características termohidrogeoquímicas de las aguas subterráneas en Galicia. O valor acrescentado das ciencias da terra no tremalismo e no engarramento da agua*, p. 281-299, Oporto, 2007.
- DREVER, J. I. *The Geochemistry of Natural Waters*, tercera edición, Prentice Hall, 436 p., 1997.
- ELLIS, A. J. y MAHON, W. A. J. «Chemistry and Geothermal Systems» Academic Press, Nueva York, 392 p., 1967.



- EPTISA. *Estudio de las fuentes complementarias de abastecimiento en la cuenca hidrográfica de los ríos Mendo y Mandeo*, 2010.
- FREEZE, R. A. y CHERRY, J. A. *Groundwater*, Prentice Hall, Inc., 1979.
- FUMEGA, F. X. y ROMANÍ, R. G. «Os usos da auga», en *As Augas de Galicia*, primera edición, Consello da Cultura Galega, 1996.
- GIBBONS, W. y MORENO, T. (eds.). *The Geology of Spain*, Geological Society of London, 632 p., 2002.
- GIGGENBACH, W. F. «Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators», *Geochimica et Cosmochimica Acta* 52, p. 2.749-2.765, 1988.
- GIGGENBACH, W. F. «Isotopic shifts in waters from geothermal and volcanic systems along convergent plate boundaries and their origin», *Earth and Planetary Science Letters* 113, p. 495-510, 1992.
- GIGGENBACH, W. F. «The origin and evolution of fluids in magmatic-hydrothermal systems», en Barnes, H. L. (ed.). *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, tercera edición, John Wiley & Sons, p. 737-796, 1997.
- GIGGENBACH, W. F. y GOGUEL, R. L. *Collection and analysis of geothermal and volcanic water and gas discharges*, Report n.º CD 2401. Department of Scientific and Industrial Research, Chemistry Division, Petone, New Zealand, 1989.
- HEM, J. D. *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Waters*, tercera edición, U. S. Geological Survey Water-Supply Paper 2254, 363 p. (<http://pubs.usgs.gov/wsp/wsp2254/>), 1991.
- HOEFS, J. *Stable Isotope Geochemistry*, cuarta edición, Springer-Verlag, 201 p., 1997.
- HOUNSLOW, A. W. *Water Quality Data: Analysis and Interpretation*, Lewis Publishers, Boca Raton, 397 p., 1995.
- IGME. *Estudio geotérmico de las manifestaciones termales de Galicia*, Instituto Geológico y Minero de España, p. 29-63, Madrid, 1980.
- JUNCOSA, R.; MEJIDE, R. y DELGADO, J. «Fuentes minerales de Galicia: características hidrogeológicas, fisicoquímicas e indicaciones terapéuticas», *Termalia* 11, p. 51-72, 2011.
- LANGMUIR, D. M. *Aqueous environmental geochemistry*, Prentice Hall, 600 p., 1996.
- MARQUES, J. M.; AIRES-BARROS, L. y GRAÇA, R. «Genesis of low-temperature sulfurous mineral waters (northern Portugal): A geochemical and isotopic approach», *Proceedings of the World Geothermal Congress 2000*, Kyushu-Tohoku, Japón, 28 de mayo al 10 de junio, 2000.
- MARQUES, J. M.; CARREIRA, P. M.; AIRES-BARROS, L. y GRAÇA, R. «Nature and role of CO<sub>2</sub> in some hot and cold HCO<sub>3</sub>/Na/CO<sub>2</sub>-rich Portuguese mineral waters: A review and reinterpretation», *Environmental Geology* 40, p. 53-63
- MARQUES, J. M.; MONTEIRO SANTOS, F. A.; GRAÇA, R.; CASTRO, R.; AIRES-BARROS, L. y MENDES VICTOR, L. A. «A geochemical and geophysical approach to derive a conceptual circulation model of CO<sub>2</sub>-rich mineral waters: A case study of Vilarelho da Raia, northern Portugal», *Hydrogeology Journal* 9, p. 584-596, 2001.
- MARQUES, J. M.; ESPINHA, J.; CARREIRA, P. M.; GRAÇA, R.; AIRES-BARROS, L.; CARVALHO, J. M.; CHAMINÉ, H. I. y BORGES, F. S. «Geothermal fluids circulation at Caldas do Moledo area, Northern Portugal: Geochemical and isotopic signatures», *Geofluids* 3, p. 189-201, 2003.
- MEJIDE, R.; DELGADO, J. y JUNCOSA, R. *Informe científico-técnico sobre as augas minero-medicinais de Galicia*, Universidade da Coruña, 2009.
- MICHARD, G. y BEUCAIRE, C. «Les eaux thermales des granites de Galice (Espagne): des eaux carbogazeuses aux eaux alcalines», *Chemical Geology* 110, p. 345-360, 1993.
- MICHEL, J. «Relationship of radium and radon with geological formations», en COTHERN, C. R. y REBERS, P. (eds). *Radon, Radium and Uranium in Drinking Water*, Lewis Publishers, Chelsea, Michigan, 1-16, 1990.
- MOPTMA. *Informe sobre los trabajos de reconocimiento hidrogeológico realizado en los alrededores de Sanxenxo (Pontevedra)*, Servicio Geológico, Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, informe 02/78, 1978.
- MOPU. *Estudio hidrogeológico para abastecimiento de agua a El Grove*, Servicio Geológico, Ministerio de Obras Públicas, estudio 12/84, 1984.
- NELSON, P. H.; RACHIELE, R. y SMITH, A. «Transport of radon in flowing boreholes at Stripa, Sweden», *Journal of Geophysical Research* 88(B3), p. 2.395-2.405, 1983.
- REMY, M. L. y LEMAITRE, N. «Eaux minérales et radioactivité», *Hydrogéologie* 4, p. 267-278, 1990.

- REY, D.; RUBIO, B.; BERNABEU, A. M. y VILAS, F. «Formation, exposure and evolution of a high-latitude beachrock in the intertidal zone of the Corrubedo complex (Ría de Arousa, Galicia, NW Spain)»; *Sedimentary Geology* 169, p. 93-105, 2004.
- RODRÍGUEZ, M. L, TABOADA, M. M. y TABOADA, M. T. «Variación de iones mayoritarios en un afloramiento de agua de un sistema granítico del noroeste del Macizo Hespérico, España», *Información Tecnológica* 16(6), p. 69-78, 2005.
- SÁNCHEZ-GUZMÁN, J. «Las aguas subterráneas y el abastecimiento urbano e industrial», *Jornadas sobre las Aguas Subterráneas. Importancia y perspectivas*, ITGE-Real Academia de Ciencias, p. 18-26, 1994.
- SÁNCHEZ-GUZMÁN, J. y GARCÍA DE LA NOCEDA, C. «Geothermal energy development in Spain – Country update report», *Proceedings of the World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turquía, 24-29/4/2005.
- SOUTO, M. G. *Estudio químico-analítico de las aguas minero-termales de la provincia de Orense*, tesis doctoral, Universidad de Santiago de Compostela, 398 p., 1990.
- STUMM, W. y MORGAN J. J. *Aquatic Chemistry*, tercera edición, John Wiley & Sons, Nueva York, 1.024 p., 1995.
- VERA, J. A. (ed.). *Geología de España; Sociedad Geológica de España – Instituto Geológico y Minero de España*, 884 p., 2004.
- VIDAL ROMANÍ, J. R. y YEPES, J. «Las terrazas del río Miño en el tramo Chantada-As Neves (límite de Galicia-Portugal)», *Acta Geológica Hispánica* 36, p. 149-164, 2001.
- WINTER, T. C.; HARVEY, J. W.; LEHN, O. y ALLEY, W. M. «Ground Water and Surface Water. A Single Resource», *U.S. Geological Survey Circular* 1.139; 87 p. (<http://pubs.usgs.gov/circ/circ1139/>), 1998.
- XUNTA DE GALICIA. *Estudio sobre abastecimiento de los núcleos de población de más de 2000 habitantes en Galicia*, inédito, 1998.
- XUNTA DE GALICIA. *Las aguas minerales en Galicia*, Consellería de Industria e Comercio, 205 p., 1995.