

REAL ACADEMIA DE CIENCIAS
EXACTAS, FISICAS Y NATURALES

**El agua subterránea como
recurso económico-ecológico
y como agente geológico**

DISCURSO

LEIDO EN EL ACTO DE SU RECEPCION

POR EL

EXCMO. SR. D. MANUEL RAMON LLAMAS
MADURGA

Y

CONTESTACION

DEL

EXCMO. SR. D. JOSE MARIA FUSTER CASAS

EL DIA 27 DE ABRIL DE 1988



MADRID

DOMICILIO DE LA ACADEMIA:
VALVERDE, 22 — TELEFONO 521 25 29
1988

Depósito Legal: M. 13.800 - 1988

REALIGRAF, S. A. - Burgos, 12 - 28039 Madrid

DISCURSO

DEL

EXCMO. SR. D. MANUEL RAMON LLAMAS
MADURGA

TEMA

EL AGUA SUBTERRANEA COMO RECURSO
ECONOMICO-ECOLOGICO Y COMO AGENTE GEOLOGICO

Excmo. Sr. Presidente.
Excmos. Sres. Académicos.
Señoras y Señores:

Cuando tuve el honor de ser elegido Académico numerario de esta Real Academia, el Gabinete de Prensa de la Universidad Autónoma de Madrid, en la que entonces prestaba mis servicios, difundió a los medios de comunicación social un breve comunicado, en el que, entre otras cosas, decía: *La Hidrogeología entra en la Real Academia de Ciencias*. Me parece que en esa afirmación, y no en mis limitados méritos personales, se expresa la razón principal para que, por unanimidad, esta docta Institución me haya elegido para ocupar la plaza de Académico numerario a la que corresponde la medalla núm. 27. Luego voy a exponer cómo en estos últimos tiempos, la Hidrogeología, ciencia de las aguas subterráneas, se ha ido transformando de una ciencia predominantemente aplicada en una disciplina básica para entender mejor múltiples fenómenos geológicos. Esta transformación dista mucho de haber finalizado; más bien diría que está todavía en la primera etapa de un brillante próximo desarrollo. Por un conjunto de circunstancias fortuitas, ha correspondido al que os habla jugar un cierto papel en la introducción de la Hidrogeología moderna en España. Probablemente eso explica que algunos buenos amigos académicos pensasen en mi nombre a la hora de dar cabida a esta nueva parcela del saber dentro de esta prestigiosa Institución.

Esta elección ha producido en mi ánimo dos sentimientos, en cierto modo, opuestos. Por una parte, una gran satisfacción al ver la Hidrogeología tan decididamente acogida en una Institución que sabe compaginar la serenidad y la solera que le otorgan su historia y la dilatada experiencia científica de sus miembros, con el dinamismo y juventud que proporciona el auténtico espíritu científico, siempre abierto a nuevos horizontes y dispuesto a nuevas conquistas. Por otra parte, he de confesar que me siento un tanto abrumado, pues, a pesar de mis buenos deseos, temo no estar a la altura científica de tan destacados compañeros.

Tradicionalmente, el acto de leer el discurso y de ocupar entre vosotros el puesto vacante, va siempre acompañado de un hondo pesar, pues supone la desaparición de una personalidad científica.

El Excmo. Sr. D. Julio Garrido Mareca, mi predecesor en el sillón que, por vuestra benevolencia, vengo a ocupar, falleció el 14 de mayo de 1982 en Madrid. Los casi seis años transcurridos sin que se haya cubierto esta plaza se deben a que fue primeramente elegido para ocuparla otro ilustre científico, D. Isidro Parga Pondal, quien, desgraciadamente, falleció, a causa de una larga y dolorosa enfermedad, antes de que le fuera posible leer su discurso de ingreso.

Julio Garrido nació en Madrid en 1911. Se licenció en Ciencias Naturales y, desde el comienzo, dedicó preferente atención a la Cristalografía, ciencia en la que se confundían su gusto por lo exacto y medido con su capacidad de observación de la Naturaleza. A comienzo de la década de los años treinta, trabajó con el apoyo económico que le supuso la obtención de varios premios Conde de Cartagena en estructuras minerales, sobre todo mediante su exploración por rayos X, en la Politécnica de Zurich y en la Sorbona. Después de nuestra guerra civil, se dedicó durante cinco años a campañas de campo para investigación de petróleos con otros dos ilustres miembros de esta Academia, Almela y Ríos. Este período, según Ríos, fue penoso para él, por apartarle de su vocación. Terminó al ser llamado por la UNESCO para las tareas de establecimiento de Centros de Documentación, que le llevaron a muy diversos países. En todos ellos dejó huella, pues, además de su tarea de documentación, en la que llegó a ser un verdadero y destacado especialista, creó Institutos de Cristalografía o colaboró con los ya existentes.

Tuve el honor de conocer por primera vez personalmente a Julio Garrido en Montevideo en 1965, donde, por aquel entonces, dirigía la Oficina Científica para Latino-América de la UNESCO. Aquel fue mi primer viaje al Nuevo Mundo, motivado precisamente por una invitación de la UNESCO para dirigir, en Buenos Aires, un curso para postgraduados sobre Hidrología Subterránea. Quizá por esta circunstancia de ser la primera vez que cruzaba el Atlántico, conservo un recuerdo especialmente grato de aquella entrevista con Julio Garrido, que precedió un par de días el comienzo del mencionado curso en Buenos Aires.

Profundo amante de su país natal, Julio Garrido regresó a España pocos años después, de manera ya permanente, para dirigir el Centro de Documentación de la Universidad Autónoma de Madrid, hasta que le

llegó el momento de la jubilación. Su relación de publicaciones es tan larga como la variedad de temas de que se ocupó, fuera del suyo favorito, que era la Cristalografía.

Sus relaciones inmediatas con esta Real Academia se establecieron al ser designado Académico correspondiente en 1970, y se completaron al ser elegido Académico numerario en 1975. Su discurso de ingreso trató, con mucha competencia, erudición y amenidad, sobre "Taxonomía matemática y filosofía de las formas de la Naturaleza". Le contestó su gran amigo el Académico D. José María Ríos, que fue también quien presentó una sentida y emotiva nota necrológica en el Pleno de la Academia del 26 de mayo de 1982. Descanse en paz.

Como habéis visto, mi relación personal con el ilustre científico cuya plaza voy a ocupar fue realmente escasa. Por ello, permitidme ahora, antes de entrar propiamente en el tema de mi discurso, que rinda homenaje, aunque sea brevemente, a otros tres académicos, ya desaparecidos, a los que mucho debe mi formación científica y humana. Les mencionaré según el orden cronológico de mis primeros contactos científicos con ellos. A D. Clemente Sáenz García, catedrático de Geología de la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid, debo esencialmente mi vocación hacia la Geología. En efecto, siguiendo el ejemplo de mi padre, ingresé en la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid en 1951 y, probablemente, como mi progenitor, me hubiese dedicado a la ingeniería hidráulica, si no hubiese sido porque, en 1952, en mi segundo año de carrera, las lecciones magistrales de D. Clemente y, sobre todo, las inolvidables excursiones geológicas por él dirigidas, me mostraron nuevos horizontes profesionales. Decidí entonces orientar mi futuro profesional hacia la Geología aplicada a la Ingeniería. Después de consultar el tema con D. Francisco Hernández Pacheco, catedrático de Geografía Física en la entonces Universidad Central, decidí iniciar la licenciatura en Ciencias Geológicas, que en sus tres primeros años simultanéé con mis estudios de ingeniería. Posteriormente, D. Francisco fue el Director de mi tesis doctoral en Ciencias Geológicas. De los dos académicos guardo un entrañable y agradecido recuerdo, no sólo por sus orientaciones científicas, sino también por su trato humano, en ambos casos cordial y enriquecedor, aunque procedente de personalidades notoriamente diferenciadas. Finalmente, también querría rendir homenaje a D. José María Albareda, de quien fui discípulo en mis estudios de doctorado. Sus lecciones, sus libros y sobre todo su entusiasmo por la investigación científica, fueron un catalizador definitivo en mi decisión de dedicarme a las tareas de docencia e investigación, en vez de seguir la tradición familiar

de la ingeniería hidráulica. Posteriormente tuve ocasión de comentar con él, en su calidad de Secretario General del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, mis inquietudes sobre el relativo abandono que la Hidrogeología tenía en España. Sus opiniones sobre la importancia futura de esta parcela del saber en todo el mundo y especialmente en España, sin duda contribuyeron significativamente a mi definitiva orientación docente e investigadora hacia la Hidrogeología, paso que di hace unos cinco lustros.

Cumplido el grato deber de agradecer el honor concedido y de rendir homenaje a mi predecesor en el puesto y a otros tres ilustres académicos, permitidme pasar sin más dilación al tema de mi discurso.

INTRODUCCION

El agua es fundamental para la vida y es, además, uno de los recursos más valiosos para la Humanidad. Desde hace tiempo, el hombre ha utilizado los recursos hídricos para finalidades muy diversas, tales como bebida, transporte, sanidad, regadío, procesos industriales y producción de energía eléctrica. Hay otros usos más recientes; entre ellos, mencionaremos los ecológicos y/o recreativos y la energía geotérmica.

Independientemente de esta consideración del agua como recurso útil para la Humanidad, es bien sabido que el agua superficial, en sus diversos estados, es agente primordial tanto en el modelado del relieve terrestre como en la casi totalidad de los procesos sedimentarios. Sin embargo, hasta fechas relativamente recientes, el relevante papel que juegan las aguas subterráneas en múltiples procesos geológicos pocas veces había sido tenido en cuenta, excepto en el casi obvio caso de los procesos de karstificación.

El objetivo principal de esta disertación es presentar una panorámica de la situación actual en España de las ciencias que se ocupan de las aguas subterráneas, tanto en su vertiente aplicada o tecnológica como en sus aspectos más básicos. Por supuesto, en esta época en que las fronteras tienden a desaparecer y las distancias a reducirse, la situación española no puede explicarse sin una casi continua referencia al acervo científico internacional. Puedo adelantar que, como en tantos otros casos (Alía, 1971), también en esta parcela del saber los problemas técnicos o prácticos han sido los que han catalizado el inicio de estudios fundamentales, que, a su vez, pronto han dado lugar a nuevas aplicaciones provechosas.

El mundo tan especializado en que vivimos hace cada día más difícil hablar y entender todos los lenguajes científicos. Cada día surgen nuevos vocablos que corresponden a nuevos conceptos: con frecuencia, esos nuevos vocablos se inspiran en los idiomas clásicos —griego y latín— de

nuestra civilización occidental. Eso suele permitir entender algo de su significado a los que tuvimos la suerte de recibir una buena formación humanística en nuestra enseñanza secundaria; sin embargo, en general, las jóvenes generaciones de científicos han sido menos afortunadas en este aspecto. En cualquier caso, a lo largo de esta exposición voy a procurar huir de los tecnicismos y de las cuestiones más especializadas que, lógicamente, no tienen especial interés para la mayoría de los que me escuchan.

El papel de las aguas subterráneas en el ciclo hidrológico ha sido conocido desde hace más de tres siglos, al menos en sus aspectos fundamentales. Sin embargo, sólo en un número reducido de países y desde no hace muchas décadas, este conocimiento se ha traducido en una gestión conjunta de las aguas superficiales y las subterráneas. Los ingenieros o planificadores de la política hidráulica oficial frecuentemente —y España no es una excepción— no han considerado el agua subterránea como un recurso hidráulico cuyo aprovechamiento racional fuera factible.

Una de las causas de esta situación puede atribuirse a la relativa juventud de la Hidrogeología, es decir, de la ciencia y de la tecnología de las aguas subterráneas (cf. Llamas, 1974). A pesar de esta frecuente “ignorancia oficial” de las aguas subterráneas, el aumento de la demanda de agua, principalmente para nuevos regadíos o para abastecimiento de grandes conurbaciones, ha conducido a una explotación intensiva de aguas subterráneas en los países áridos y semiáridos, que casi siempre fue —y continúa siendo— poco o nada planificada. En algunas regiones, esta explotación anárquica ha ocasionado problemas inesperados, tales como el descenso excesivo de niveles piezométricos, la intrusión de aguas salinas, la subsidencia del terreno o graves daños a valiosos ecosistemas.

Ahora bien, existen amplias regiones del mundo —y España se encuentra entre ellas— en las que hay evidencia de serios daños en los suelos y aguas subterráneas que no han sido ocasionados por la explotación de las aguas subterráneas, sino por actividades industriales o agrícolas. Como botón de muestra, sólo mencionaré dos casos: *a*) la contaminación por nitratos de las aguas subterráneas de amplias zonas, debida al uso de fertilizantes agrícolas, y *b*) la salinización y/o encharcamiento de algunos nuevos y costosos regadíos con aguas superficiales, a causa de no haber realizado previamente los adecuados estudios hidrogeológicos.

Sin embargo, sería miope pensar que el presente —y especialmente el futuro de la Hidrogeología— se reduce a un simple papel de ciencia

aplicada, para permitir el mejor uso y protección de un recurso natural tan valioso como el agua subterránea. Como he escrito recientemente [Llamas, 1987a)], ésta es hoy, y quizá continuará siendo durante algunas décadas, la tarea de la mayoría de los hidrogeólogos profesionales y de un buen número de investigadores; pero, sin duda, el presente y el futuro de la Hidrogeología no se limita a este campo aplicado. En efecto, desde hace ya algunos años, algunos científicos (cf. Freeze and Cherry, 1979) vienen poniendo de manifiesto el importante papel que las aguas subterráneas juegan en algunos procesos geológicos fundamentales.

En el último cuarto de siglo, los geólogos hemos sido testigos de espectaculares descubrimientos científicos, relacionados principalmente con la Tectónica de placas. Ahora parece claro que bajo los océanos hay una corteza relativamente joven y delgada renovada continuamente; en cambio, los continentes menos densos aparecen como masas o islas rígidas, excepto cuando colisionan entre sí, como en el Himalaya. Los grandes cinturones montañosos volcánicos —y de modo especial el circumpacífico— parecen claramente relacionados con las denominadas zonas de subducción, donde las placas o cortezas oceánicas se introducen bajo los rígidos márgenes continentales. Se tiene hoy día una concepción dinámica de la superficie terrestre en la que, más o menos, una docena de placas colisionan entre sí o se sumergen unas bajo otras, o sencillamente se “arañan” en fallas transformantes o de otro tipo. Al mismo tiempo, los registros geológicos están permitiendo reconstruir, cada vez con mayor garantía, los cambios climáticos y, en algunos casos, sus probables causas. Este conocimiento de los paleoclimas tiene notable importancia, hasta el punto de que en cierta forma hoy habría que invertir el viejo lema del actualismo y, en vez de decir que “el presente es la clave del pasado”, tendríamos ahora que enunciar que “el pasado es la clave del futuro”. Veremos en la segunda parte de esta conferencia cómo la Hidrogeología está contribuyendo al avance de estos nuevos campos. Entre los procesos geológicos más relacionados con las aguas subterráneas, cabe mencionar a título introductorio: la génesis (y el posible futuro control) de ciertos terremotos, la migración y acumulación de petróleo, la génesis de yacimientos minerales estratoligados o hidrotermales y, por supuesto, la génesis y evolución del karst.

En resumen, a lo largo de esta charla que ustedes van a tener la amabilidad y paciencia de escuchar, espero aportar datos suficientes para hacer ver, por una parte, que la Hidrogeología constituye hoy día un área de investigación fundamental para el mejor conocimiento de los procesos geológicos de la corteza terrestre; y por otra parte, que simultáneamente

esta Ciencia de las Aguas Subterráneas tiene aplicaciones cotidianas e importantes para la vida económica, social y política de nuestro país.

Veremos también que es mucho lo que se ha avanzado en las dos últimas décadas, pero todavía se requiere un esfuerzo suplementario considerable para que la Hidrogeología española se sitúe en el plano que exige nuestro nivel económico, cultural y geográfico. En efecto, no debemos olvidar que vivimos en un país aceptablemente desarrollado desde el punto de vista económico y plenamente insertado en la tradición científica y cultural de la civilización occidental. Al mismo tiempo, España es el país más árido de Europa y, por ello, un buen conocimiento de nuestra Hidrogeología es una imperiosa necesidad. Continuar sin tener en cuenta adecuadamente estas realidades está conduciendo no sólo a despilfarros económicos del dinero del contribuyente español, sino a transferir a las generaciones futuras un conjunto de graves —a veces insolubles— problemas relacionados con el medio ambiente o con la destrucción de recursos económicos.

LA EVOLUCION HISTORICA DE LOS PRINCIPALES CONCEPTOS HIDROGEOLOGICOS

Augusto Comte sostenía que “nadie puede realmente ser maestro de una ciencia a menos que estudie su historia específica”. Independientemente del peso mayor o menor que quiera darse a esta aseveración, en nuestro caso, dada la relativa juventud de la ciencia hidrogeológica, no parece ocioso dedicar algún tiempo a recordar lo jalones fundamentales que han conducido al actual “estado del arte” en este campo del saber. En esta exposición voy a seguir fundamentalmente y de forma resumida —aunque enriquecida con algunas referencias a publicaciones posteriores— lo que sobre este tema escribí hace ya unos cuantos años (Custodio y Llamas, 1976, págs. 251-256).

La utilización de las aguas subterráneas en las civilizaciones antiguas

Parece obvio que el uso de las aguas subterráneas que afloran de modo espontáneo en los manantiales es tan antiguo como la humanidad. ahora bien, suele considerarse que el exponente más característico e importante del ingenio humano para la captación de aguas subterráneas en la antigüedad lo constituyen las galerías de infiltración conocidas generalmente con el nombre de *khanats*. Consisten esas obras en una galería casi horizontal, aunque con una ligera pendiente, excavada en el terreno desde pozos de acceso verticales; en su zona de aguas arriba, el *khanat* penetra en la zona saturada de un acuífero y drena sus aguas al crear una línea de menor potencial. Este tipo de captaciones ya tuvieron un amplio desarrollo hace casi tres milenios en el Próximo Oriente, donde llegaron a regarse cientos de miles de hectáreas gracias a complejos y extensos sistemas de *khanats*. Esta tecnología se difundió ampliamente en los países mediterráneos. En España fue especialmente impulsada por los árabes. Como dato anecdótico cabe recordar que la ciudad de Madrid no sólo se abas-

teció de agua potable hasta 1858 con captaciones del tipo *khanat*, sino que el nombre de Madrid parece derivar etimológicamente de la existencia y abundancia de dichas captaciones (Llamas, 1976).

La captación de aguas subterráneas mediante pozos excavados también estuvo muy extendida en los países del área mediterránea. Por ejemplo, son muy frecuentes las referencias del Génesis a la construcción de pozos por los israelitas y a los problemas políticos o sociales, ocurridos hace más de tres mil años, relacionados con estas captaciones de aguas subterráneas. La técnica de los pozos perforados desde la superficie del terreno, mediante máquinas de sondeo a percusión, no se desarrolló en Europa hasta hace unos ocho siglos; en cambio, en China ya se utilizaba esa técnica de sondeo hace unos quince siglos. Esas máquinas de sondeos estaban en gran parte hechas de madera y eran accionadas por fuerza humana. Al parecer, alcanzaron profundidades de perforación superiores a mil metros. Estas perforaciones no tenían por objeto obtener agua dulce, sino gas o agua salada.

Las primeras interpretaciones científicas: el mundo clásico greco-romano

Como en tantos otros casos, el aprovechamiento de las aguas subterráneas por el hombre ha ido bastante por delante de la adquisición de un adecuado conocimiento sobre los principios físicos que gobiernan su origen y movimiento. También, como es usual, los primeros intentos conocidos de explicar racionalmente el origen de las aguas subterráneas parecen estar en el mundo clásico. En efecto, suele ser generalmente admitido que la Filosofía, y con ella la Ciencia, nacen hacia el siglo VII a.C. en las costas occidentales de Asia Menor, gracias al talento de una serie de pensadores que suelen ser englobados en la común denominación de Escuela Jonia.

La Escuela Jonia marca el comienzo de una época realmente sorprendente, que duró menos de cuatro siglos. En ese tiempo y en un área geográfica tan reducida, se suceden una serie de figuras estelares, no sólo en el campo de la filosofía, de las matemáticas y de la física, sino también en las artes plásticas y en la literatura. El impacto de la cultura helénica en la posterior civilización romana primero, y después en la medieval y en la renacentista, a veces, no es adecuadamente captado por los científicos o ingenieros de nuestra época, que no suelen ser conscientes de que nuestra civilización occidental, con su aprecio por la cultura y por la libre

actividad intelectual, deriva algunas de sus categorías más básicas de las ideas que, hace más de dos mil años, acuñó un pequeño conjunto de hombres excepcionales que vivieron en una reducida zona del ámbito mediterráneo.

Los griegos fueron los primeros en elucubrar sobre el origen de las aguas subterráneas. Sin embargo, sus contribuciones pueden calificarse de erróneas e, incluso, contraproducentes. Su merecido prestigio en otras áreas del saber, condujo a que sus concepciones equivocadas se consolidasen y fuesen admitidas, casi sin discusión, durante unos veinte siglos.

Parece lógico pensar que las ideas de los pensadores helenos estuvieron influidas por el medio natural en el que vivieron. Las formaciones calcáreas que cubren buena parte de esa zona mediterránea dan lugar a una circulación kárstica típica, con sus cuevas, sumideros y grandes manantiales. Esto contribuyó probablemente a hacerles pensar que la lluvia sólo podía jugar un papel secundario en el origen de los ríos y de las fuentes.

Como es bien sabido, los dos filósofos griegos que mayor influencia han tenido en la posteridad han sido Platón y Aristóteles. Platón (427-347 a.C.) concibió que el agua de los ríos y fuentes procedía de una serie de conductos conectados entre sí, que finalmente terminaban en una gigantesca caverna subterránea —el Tártaro— de la que procedían, por ascenso, sus aguas. A su vez, todas las aguas de los ríos y fuentes volvían al Tártaro por los mismos conductos o iban al mar, de donde también retornaban al Tártaro por otra serie de conductos subterráneos. El mecanismo que hacía moverse estas aguas no era explicado.

Aristóteles (384-322 a.C.) fue un gran observador de la naturaleza. Su concepción del ciclo hidrológico está expuesta en su libro “Meteorología” y difiere de la de Platón en que supone que el agua de las fuentes procede de un conjunto de oquedades y conductos que hacen del terreno una especie de esponja. En estos conductos, el agua se origina principalmente por la condensación por enfriamiento del aire que los llena.

La obra romana más interesante, desde el punto de vista de la Hidrología subterránea, es probablemente la del arquitecto Vitrubio, que vivió en los primeros años de nuestra era. En su obra “De Architectura Libri Decem” dedica el capítulo VII al agua; en él se trata de los medios de localizar nuevas fuentes de agua, de las formas de captar esas fuentes y de su distribución urbana; incluye también una disertación sobre las posibi-

lidades de encontrar agua en los distintos tipos de suelos y de las relaciones entre los tipos de suelos y la calidad del agua. Vitrubio sostiene que el agua de la lluvia o de la fusión de la nieve se infiltra en el terreno y aparece de nuevo en las zonas bajas, en forma de manantiales; parece ser, pues, el primero que expone una interpretación correcta del origen del agua de los manantiales. Sus teorías, sin embargo, tuvieron poco eco. Una cierta explicación de la acertada concepción de Vitrubio puede estar en que su actividad profesional tuvo lugar, en parte, en la región del Vesubio, en la que abundan los materiales volcánicos permeables, cuyo comportamiento facilita más la comprensión del ciclo hidrológico que los paisajes kársticos en los que vivieron Platón y Aristóteles.

La Edad Media y el Renacimiento

La caída del Imperio Romano de Occidente en el siglo V, por la invasión de los bárbaros, supuso una congelación casi total del progreso científico durante muchos siglos. La cultura clásica, o mejor lo poco que se salvó de ella, se refugió en los monasterios y escuelas catedralicias primero, y más tarde, en algunas escuelas palatinas. Entre ellas, la Escuela de Toledo jugó un importante papel en el resurgimiento de la cultura occidental gracias a las traducciones al latín de las versiones árabes de las obras de los filósofos griegos; entre otras, fue traducida la “Meteorología” de Aristóteles.

La actividad intelectual de los siglos XII y XIII supone un jalón muy importante en la historia de la cultura occidental. Ciertamente, la teología fue la rama del saber más cultivada, pero la utilización intensiva que los teólogos hicieron de la filosofía helénica, tuvo un efecto fertilizante, del que bien puede decirse que, en gran parte, va a surgir toda la ciencia occidental, que es, prácticamente, la ciencia actual de la Humanidad.

La fundación de las Universidades por la Iglesia en el siglo XII impulsa notablemente la producción y transmisión de nuevos conocimientos. En esas Universidades, en el siglo XIII, comenzaron a oírse voces autorizadas, como las del alemán Alberto Magno (1206-1280) y del inglés Roger Bacon (1214-1292), quienes sostuvieron que, al tratar de los problemas físicos, solamente la experimentación tiene fuerza y validez demostrativa. La frase de Bacon (*Opus Maius*, II, 167) “*Sine experientia, nihil sufficienter sciri potest*” merecería todavía hoy ser repetida con frecuencia a todos los que se dedican a la investigación hidrogeológica.

El notable prestigio de la filosofía de Aristóteles y Platón en las Universidades medievales, como es lógico, no propició la modificación de las ideas que ambos filósofos tuvieron sobre el ciclo hidrológico. En cambio, en ese mismo período, la tecnología de la construcción de pozos experimentó un fuerte impulso; se inventó la técnica de la perforación a percusión, con varios siglos de retraso respecto a la tecnología china, pero de modo totalmente independiente. El impulso para este desarrollo procede ampliamente del descubrimiento de los pozos surgentes, primero en Flandes, hacia el año 1100, y algunas décadas más tarde, en el sureste de Inglaterra y en el norte de Italia. La perforación de este tipo de pozos tuvo un especial desarrollo en la región de Artois, en Francia, y sus pozos fueron tan famosos que todavía hoy es frecuente que se utilice el término de pozo artesiano, como sinónimo de pozo surgente.

Nacimiento y desarrollo de la Hidrogeología moderna

a) Los fundadores

El siglo XVII marca el comienzo de la era de la Hidrología experimental. Pierre Perrault (1608-1680), en su libro “De l’origine des fontaines”, informaba de sus medidas de la lluvia en la cuenca del Sena durante tres años; estimó el caudal anual del río y concluyó que era una sexta parte del volumen de la lluvia caída en la cuenca vertiente, probando así que la precipitación atmosférica era más que suficiente para explicar el caudal del río.

Edmé Mariotte (1620-1684) realizó medidas de lluvia y caudales muy similares a los de Perrault, pero con mayor precisión en la medida de los caudales del río Sena, cerca de París, mediante el uso de flotadores, y llegó a conclusiones análogas a las de Perrault. Mariotte midió también la infiltración del agua de lluvia en una especie de lisímetro y observó que esta infiltración —de modo análogo al caudal de las fuentes— variaba con la lluvia; por ello, supuso que las fuentes también son alimentadas por el agua de lluvia.

El inglés Edmund Halley (1656-1742), más conocido como astrónomo, estudió, por decirlo así, la otra mitad del ciclo hidrológico. Midió experimentalmente la evaporación y llegó a la conclusión de que el agua evaporada de los mares y los ríos es suficiente para producir la lluvia que alimenta a estos últimos.

Durante los siglos XVII y XVIII continuaron coexistiendo las teorías de Perrault y Halley con otras erróneas, sostenidas por científicos de indudable categoría en otros campos. Por ejemplo, el astrónomo alemán Kepler enseñó que la tierra era semejante a un gigantesco animal que digería el agua del mar y como resultado de su metabolismo, producía el agua de las fuentes; parecidas fueron las ideas que el matemático alemán Kircher expuso en su “Mundus Subterraneus”, publicado en 1665, y que durante muchos años fue un texto clásico en muchas Universidades.

Aunque Perrault, Mariotte y Halley ya hicieron ver el papel de la infiltración y de la fase subterránea del ciclo hidrológico, es evidente que no puede hablarse de la existencia de una auténtica Hidrogeología con anterioridad a que fueran establecidos los principios fundamentales de la ciencia geológica en los finales del siglo XVIII y comienzos del XIX, gracias a la labor de algunos científicos europeos, especialmente Hutton y Smith en Inglaterra, Werner en Alemania y Brogniart en Francia. Es interesante recordar que los primeros cortes geológicos conocidos fueron publicados en 1715 por el científico italiano Vallisnieri, para explicar el artesianismo de los pozos de Módena.

b) *La Hidrogeología moderna*

A lo largo de los últimos ciento cincuenta años, el desarrollo de la Hidrogeología puede decirse que ha seguido dos líneas paralelas más o menos conectadas; la primera ha sido el estudio de la relación entre la geología y el agua del subsuelo, desarrollada por geólogos; la segunda, la aplicación de las leyes de la física para deducir el flujo del agua en el terreno, llevada a cabo predominantemente por ingenieros hidráulicos. A esas dos líneas se podría añadir una tercera, la técnica de explotación de las aguas subterráneas (perforación de pozos y sistemas de bombeo), que no vamos a comentar ahora, aunque sus repercusiones prácticas sean notables.

Es difícil asociar a nombres muy determinados el continuo progreso que se ha venido desarrollando en los aspectos más geológicos o de explotación de las aguas subterráneas. En opinión del americano Meinzer, el trabajo más sistemático y efectivo en este campo se debió inicialmente a los científicos franceses, que fueron especialmente activos en la primera mitad del siglo XIX. Así, Belgrand, en 1846, publica su obra “Etude Hydrologique de la Partie Superieure de la Seine”, en la que hace la distinción fundamental entre las formaciones permeables e impermeables; diez años

más tarde, el presbítero Paramelle publica “L’Art de découvrir sources”, que tuvo amplia difusión e influencia en toda Europa. En 1887, aparece en tres volúmenes la obra de Daubrée que tiene por título “Les eaux souterraines à l’époque actuelle et à les époques anciennes”, que puede ser considerada como uno de los primeros tratados de los aspectos geológicos de las aguas subterráneas.

En Alemania también tuvieron un fuerte impulso los estudios hidrogeológicos; quizá las obras de síntesis más representativas de esta época son la de Keilhack, “Grundwasser und Quellenkunde”, aparecida en Berlín en 1912, y la de Prinz, “Lehrburch der Hydrologie”, que ve la luz pública también en Berlín, siete años más tarde.

El número de geólogos de los Estados Unidos que se han ocupado de las aguas subterráneas en los últimos ciento cincuenta años probablemente supera al del resto de los países del mundo occidental. Destaca, entre ellos, Oscar Meinzer, cuyo principal mérito fue su labor de síntesis y estructuración de la Hidrogeología y el fuerte impulso que dio a estos estudios en el U. S. Geological Survey, donde desarrolló la mayor parte de su actividad.

Los sucesivos avances en el campo de la Hidrología subterránea cuantitativa son más fácilmente identificables, pues frecuentemente van unidos a la publicación de artículos que justifican, teórica o experimentalmente, alguna ley o fórmula. La hora cero de este desarrollo puede decirse que es el trabajo del ingeniero francés Henry Darcy, titulado “Les fontaines publiques de la ville de Dijon”, que vio la luz en 1856. Darcy fue el primero que estableció la ley matemática que rige el fluido del agua subterránea, si bien Hagen y Poiseuille habían encontrado una ley equivalente pocas décadas antes, al estudiar el flujo laminar en tuberías. Siete años más tarde, en 1863, otro francés, Jules Dupuit, fue el primero en aplicar la ley de Darcy para calcular el flujo del agua hacia un pozo.

La contribución alemana más notable fue hecha por Adolph Thiem (1836-1908), que analizó los problemas referentes al flujo del agua hacia los pozos y hacia las galerías. Intentó estudiar el régimen transitorio, pero los resultados —como él mismo admitió— fueron de poca utilidad práctica. Ensayó también el uso de trazadores con resultados desiguales.

El artículo del austríaco Forstheimer, “Über die Ergebigkeit von Brunnen Anlagen und Sickerschlitzten”, publicado en 1886, señala la primera aplicación del cálculo diferencial (teoría de campos), al flujo del agua

subterránea. No obstante, tuvieron que pasar más de cuarenta años antes de que se escribiese el primer tratado sistemático de mecánica de fluidos aplicado al flujo subterráneo; fue la obra de Muskat, aparecida en 1937, que lleva por título "The flow of homogeneous fluids through porous media".

Dos años antes, en 1935, el norteamericano Theis, basándose en la analogía del flujo del agua con el del calor, publicó un método para el estudio del flujo del agua subterránea hacia los pozos en régimen transitorio. En este trabajo, Theis definió formalmente el concepto de coeficiente de almacenamiento elástico, que tiene en cuenta conjuntamente la compresibilidad del agua y la de la matriz sólida del acuífero. Pocos años antes, Terzaghi había definido la noción de "esfuerzo efectivo" para el análisis de la consolidación de arcillas saturadas de agua. El método de Theis ha sido desarrollado posteriormente por multitud de autores, aplicándolo a situaciones más complejas al cambiar las condiciones en los límites.

Otro jalón importante en este campo lo marca un trabajo del americano Hubbert, titulado "The theory of groundwater motion", publicado en 1940. Hubbert dedujo la ley de Darcy a partir de las ecuaciones generales de Navier-Stokes e introdujo el concepto de potencial de fuerza, más general que el concepto de potencial de velocidad utilizado por Forscheimer.

El conjunto de leyes que se admite que rigen el movimiento del agua subterránea constituye un capítulo particular de una rama de la Física, la Mecánica de Fluidos; ésta, a su vez, es muy similar a otras áreas de la Física, como la Termología y la Electricidad, y, en general, todas aquellas en las que es aplicable la "teoría de Campos". De hecho, buena parte de los desarrollos fisicomatemáticos de la Hidrogeología, por ejemplo, la fórmula de Theiss antes mencionada, han sido simples transposiciones analógicas de otros problemas fisicomatemáticos similares que habían sido resueltos con anterioridad.

Como Back y Freeze (1983) exponen, los aspectos químicos de la Hidrogeología se desarrollan de modo completamente diferente de los aspectos físicos. En un principio, en los problemas hidráulicos predominan los aspectos cuantitativos sobre los cualitativos para los que, por otra parte, la base teórica disponible era escasa. Parece que los primeros análisis químicos realizados estuvieron relacionados con manantiales minero-medicinales. El desarrollo de las máquinas de vapor también exigió

un progresivo conocimiento de las características químicas de las aguas, para evitar los frecuentes problemas de incrustación o corrosión de las calderas. Más adelante, las normas de potabilidad de las aguas fueron exigiendo una mayor frecuencia y una mejor técnica de análisis químicos de aguas. Pronto esta tendencia se extendió a las aguas destinadas a usos agrícolas o industriales.

Así pues, casi todos los estudios de la química del agua subterránea tuvieron inicialmente la simple finalidad de determinar la adecuación del agua considerada para sus posibles usos. La existencia de relaciones entre el sistema de flujo, la mineralogía de los acuíferos y la distribución espacial de los constituyentes químicos de las aguas, por lo general, no fue considerada en detalle hasta bien entrado el presente siglo. Esto no fue óbice para que existiera un general acuerdo sobre la existencia de una cierta relación entre las características químicas de las aguas subterráneas y las de los terrenos por los que esas aguas han circulado; por ejemplo, era bien conocido que en los terrenos graníticos predominaban las aguas bicarbonatadas de baja salinidad, y en los terrenos con evaporitas, las aguas sulfatadas o cloruradas.

Ya desde el primer tercio de este siglo, los problemas prácticos originados por la intrusión de agua marina natural —o especialmente la provocada por los bombeos— en los acuíferos costeros estimularon sensiblemente el desarrollo de los aspectos físicos y químicos de la ciencia hidrogeológica. Independientemente de ello, muchas de las importantes reacciones que tienen lugar en el subsuelo, tales como cambio iónico, precipitación-disolución, procesos redox, fueron identificados antes de la década de los cincuenta por diversos investigadores. Pero es a partir de esa década cuando estos datos se integran mediante la hipótesis del equilibrio químico y su correspondiente ley de acción de masas. Esta metodología es introducida especialmente por Schoeller en Francia y por Garrels en los Estados Unidos. Según Back and Freeze (1983), la ley de acción de masas ha sido para la Hidrogeología química lo que la ley de Darcy para la Hidrogeología física. En la misma década se inicia también el uso de los análisis isotópicos para determinar la génesis y edad del agua subterránea; desde entonces, esta metodología ha ido en continuo progreso.

Para terminar esta breve panorámica del desarrollo de la Hidrogeología química, mencionaremos que ha sido en la década pasada cuando se inician los modelos matemáticos, analíticos o digitales que tratan el flujo y transporte de solutos y/o calor en las aguas subterráneas. La ecuación del transporte de solutos incluye los términos de transporte de masa (por

advección y por dispersión-difusión) y un componente de transferencia de masa —también llamado término reactivo—, que incluye los efectos de todas las reacciones químicas, tanto entre los fluidos como entre los fluidos y la matriz sólida del acuífero; en este término reactivo también puede incluirse la degradación bioquímica o la desintegración radiactiva de algún componente. Al estudio de las múltiples y complejas variantes que puede adoptar este término reactivo es hacia donde se dirige hoy día buena parte de los esfuerzos de la investigación hidrogeoquímica.

En resumen, el estudio de las aguas subterráneas requiere hoy el conocimiento de muchos principios básicos de la Geología, la Física, la Química y las Matemáticas. La Geología nos suministra un conocimiento cualitativo general que es esencial, pero son la Física y la Química las que nos proporcionan los instrumentos para desarrollar un análisis cuantitativo.

Finalmente, conviene recordar que, a medida que la Hidrogeología se convierte en una ciencia más precisa, más próxima a la realidad, más cuantitativa, el lenguaje matemático va adquiriendo mayor importancia. En la Hidrogeología, como en otras muchas áreas de las Ciencias de la Naturaleza, la aparición y la fácil accesibilidad económica de los ordenadores digitales está contribuyendo de modo rápido y decisivo a su “matematización”. En efecto, los métodos matemáticos propuestos por algunos de los autores clásicos antes mencionados, como Forheimer, Theiss, Muskat, fueron métodos inspirados en anteriores investigaciones de la matemática aplicada, desarrollados originalmente para resolver problemas de transmisión de calor, flujo eléctrico, magnetismo, etc. Suelen ser métodos analíticos cuya resolución sólo es posible con hipótesis muy simplificadas de la realidad, en lo que se refiere a la distribución espacial y temporal de los parámetros y a las condiciones iniciales y en los límites. Los métodos numéricos, cuya aplicación práctica ha hecho posible y fácil el ordenador digital, han supuesto un cambio radical. De modo que, ya hoy, en Hidrogeología pocos avances significativos se pueden realizar sin la ayuda de algún tipo de modelo digital, tanto para contrastar la verosimilitud de modelos conceptuales como para analizar sistemas acuíferos reales. Por supuesto, existe el peligro de que se produzca una exageración en el uso de los instrumentos matemáticos, con olvido del “mundo real”, es decir, de la comprensión adecuada de los procesos naturales. Anderson (1983) describió hace ya un lustro el peligro de una excesiva credulidad o respeto por los resultados de los modelos digitales. Más recientemente, Lehr (1987) llama la atención sobre el hecho de que está surgiendo una generación de “analistas de acuíferos analfabetos” debido a un abuso de los modelos digitales.

Tendencias en el desarrollo de la Hidrogeología

Solamente voy a hacer aquí unas breves consideraciones sobre la influencia que en el área científica que estamos considerando parecen estar teniendo las recientes teorías epistemológicas. Me refiero especialmente a las de autores como Popper, Kuhn, Fayerabend, Lakatos y otros. Una lúcida síntesis de los principales trabajos sobre Filosofía de la Ciencia en los últimos años puede verse en Artigas (1985) y una aplicación a la Hidrología, en Beven (1987).

Sin duda, el ambiente científico actual —a pesar de los sorprendentes logros tecnológicos conseguidos en los últimos siglos— dista mucho de la ingenua confianza en el valor de la “Ciencia” que caracterizó a gran parte de la comunidad científica desde el “siglo de las luces”. En amplios sectores quizá predomina un cierto pesimismo metafísico: el método científico, nos dirá Popper, es esencialmente inductivo, y por ello no podemos nunca asegurar que una teoría es verdadera; únicamente cuando la observación demuestre que esa teoría no se cumple, podremos declarar que esa teoría es falsa.

Como es sabido, para otros autores actuales el valor de una teoría científica o “paradigma” está esencialmente ligado a su aceptación por una comunidad científica. El cambio o transición de un paradigma a otro puede deberse a causas sobre las que parece existir poca unanimidad entre los epistemólogos actuales.

La Hidrología, en general, y la Hidrogeología, en particular, son Ciencias de la Naturaleza. Ello quiere decir que se exige extrapolar los resultados de teorías —por lo general determinísticas— elaboradas en el laboratorio o en la pequeña estación experimental, a dominios naturales con una escala mucho mayor. El proceso natural en cuestión suele ser analizado bien sea de un modo agregado (*lumped*), en el que se asigna al entorno considerado unos parámetros medios y unas condiciones iniciales y en los límites simplificadas, bien sea de un modo distribuido, en el que a cada zona o parcela del entorno general se le asignan parámetros y condiciones iniciales y en los límites que se consideran “adecuadamente” representativos de la realidad. Sin duda, los modelos distribuidos no hubieran sido prácticamente posibles sin la notable asequibilidad de los actuales medios de cálculo electrónico.

En una primera visión, parece que los modelos distribuidos podrían resolver gran parte de nuestros problemas. La realidad dista mucho de

ser así. En primer lugar, todavía existen numerosas incertidumbres sobre algunos procesos básicos a escala de laboratorio o incluso a escala microscópica. Basta recordar, por ejemplo, entre los más sencillos, el ámbito de validez de la ley de Darcy o el modo de evaluar la dispersión hidrodinámica; si se entra en el campo de las reacciones roca-agua subterránea, las dudas sobre el desarrollo de algunos procesos químicos fundamentales son aún más amplias. Es de esperar, no obstante, que, en los próximos años, los estudios experimentales en el laboratorio despejen muchas de las incertidumbres actuales.

En segundo término, bastantes modelos hidrogeológicos de carácter tridimensional y con consideración conjunta del flujo y la calidad del agua, son prácticamente inabordables por la cantidad de tiempo de cálculo que exigen, aun en los ordenadores más rápidos y de mayores dimensiones actualmente disponibles.

En tercer lugar, los estudios hidrogeológicos casi siempre tendrán una importante fuente de incertidumbre, ya que, de hecho, pocas veces se podrán conocer adecuadamente los parámetros y condiciones en los límites e iniciales que intervienen en las ecuaciones de la correspondiente teoría. Es más, la observación de las propias variables de estado (potencial hidráulico, o concentración química, por ejemplo) que pueden utilizarse para los procesos de calibración y/o validación de los modelos, también puede adolecer de un grado importante de inexactitud.

La necesidad legal o política de hacer predicciones en el tiempo y en el espacio sobre determinados problemas en relación con las aguas subterráneas, está poniendo de manifiesto de modo vital la urgente necesidad de arrinconar buena parte de los modelos utilizados hasta ahora, que solían dar la "solución" del problema o quizá el conjunto de soluciones correspondientes a un conjunto de hipótesis o de escenarios. Parece que la demanda intelectual —y esperemos que la social también— lo que pide es que las predicciones hidrogeológicas den un rango de valores de las correspondientes variables de estado, y que ese rango de valores vaya unido a su evaluación estadística. En otras palabras, se ha de procurar que los modelos hidrogeológicos sean realistas y reflejen tanto lo que se sabe como lo que no se sabe. El intento de alcanzar este objetivo está impulsando desde hace ya algunos años la introducción de métodos estadísticos cada vez más perfeccionados en el campo de la Hidrogeología. No parece probable que esta tendencia se aminore en los próximos años.

La Hidrogeología en España

Sólo unas breves palabras en relación con el desarrollo de la Hidrogeología en España. Hasta épocas muy recientes —y con algunas raras pero valiosas excepciones—, puede asegurarse que en España los estudios de aguas subterráneas han estado mucho más vinculados a la investigación geológica que a la hidrológica. Probablemente esta situación es consecuencia de la organización administrativa de las aguas, que ha estado vigente en la legislación española desde hace más de un siglo hasta el comienzo del año 1986. Ello supuso, de hecho, una separación entre las aguas superficiales y las subterráneas. Por ello, es lógico que la mayor parte de los trabajos importantes de la Hidrología subterránea estén en España íntimamente relacionados con el desarrollo de la Geología.

La Geología fue una de las no muchas actividades científicas que durante el siglo XIX tuvieron en España un desarrollo casi paralelo al de los países europeos más avanzados. Los núcleos fundamentales de labor durante el pasado siglo fueron en Madrid el Instituto Geológico y Minero, y el Museo Nacional de Ciencias Naturales; en Barcelona, el Seminario Conciliar.

Los primeros estudios hidrogeológicos publicados se deben a la actividad del grupo de ingenieros de minas que constituyó la Comisión del Mapa Geológico Nacional (organismo que luego se transformó en el Instituto Geológico y Minero). Casi todas las Memorias provinciales, cuya publicación comienza en 1873, dedicaron un capítulo a las cuestiones de aguas, tanto superficiales como subterráneas, si bien ese capítulo suele tener un carácter esencialmente descriptivo.

En 1880, Vilanova y Piera, catedrático de Paleontología de la Universidad de Madrid, publica el libro “Teoría y Práctica de los Pozos Artesianos y Arte de Alumbrar Aguas”, que, según este autor, fue el primer libro de este género escrito por un español. Este libro presenta un notable interés, pues su autor une a su condición de “geólogo puro”, avalada por múltiples y acreditadas publicaciones, su sentido práctico adquirido por la intervención directa en la perforación de pozos, algunos de los cuales se efectuaron por cuenta suya.

En 1896, el ingeniero de caminos catalán Moragas publica un extenso y excelente trabajo sobre el acuífero del delta del Besós, que probablemente es el primer estudio realmente cuantitativo de Hidrología subterránea, publicado en la lengua de Cervantes. Desgraciadamente, el camino iniciado por Moragas no tuvo continuadores.

En 1900, el ingeniero de minas Bentabol y Ureta publica "Las Aguas de España y Portugal", que es probablemente el primer estudio hidrológico de conjunto realizado hasta aquella fecha.

Los ingenieros del Instituto Geológico y Minero continuaron ocupándose, con frecuencia, del tema de las aguas subterráneas. Por lo general, estos trabajos contienen abundante información geológica, pero, en cambio, en ellos escasean los datos hidrológicos concretos y su valoración, de acuerdo con las teorías de la época; los trabajos de Thiem, Forchheimer, Meinzer, Muskat, Theiss, etc., casi nunca son mencionados.

En lo que respecta a la geología universitaria, el panorama no es más optimista; las publicaciones de Fernández Navarro, Faura y Sans, Ferrando, Darder Pericás, etc., siguen también la línea descriptiva o geológica y no suelen mencionar nunca los avances o logros publicados por los científicos contemporáneos. Como dato curioso, Darder Pericás publica en 1932 un libro sobre aguas subterráneas, en el que dedica una buena parte al estudio y defensa de la Radiestesia o Rbdomancia.

En lo que respecta a los ingenieros hidráulicos, después del trabajo de Moragas, prácticamente no se vuelve a escribir sobre Hidrología subterránea hasta el libro de Benítez, publicado en 1963, en el que, por primera vez, se exponen en España, aunque sea de modo muy resumido, las teorías modernas de hidráulica de pozos.

Desde mediados de la década de los años sesenta, los estudios hidrogeológicos han tenido en nuestro país un fuerte impulso. En su inicio, con un carácter predominantemente aplicado, fueron desarrollados desde varios órganos de la Administración; actualmente, varios Departamentos universitarios juegan un papel importante, quizá incluso predominante, en este tipo de investigaciones. Pero esto ya no es pasado, sino presente, y de ello se hablará después.

SINGULARIDAD DE LAS PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS

El agua se presenta en cantidades importantes en los distintos ámbitos de la hidrosfera (atmósfera, océanos, lagos, ríos, casquetes polares, aguas subterráneas, etc.). Puede hallarse en estado sólido, líquido o gaseoso. El agua líquida es la fase más importante. El agua, después del aire, es el elemento más móvil de la corteza terrestre y ejerce una importante labor en los procesos de meteorización física y química de las rocas y en el transporte de los sedimentos. Además, el agua es el disolvente más común y poderoso; como consecuencia de ello juega un papel decisivo en la distribución geoquímica de los diversos elementos en las capas superiores de la corteza terrestre. Por sus propiedades mecánicas, influye en el estado tensional del conjunto roca-agua, con los consiguientes efectos en procesos sísmicos o de estabilidad de laderas. Finalmente, para no hacer demasiado extensa esta enumeración, recordaré que el movimiento del agua subterránea también juega un papel importante en la distribución de la temperatura en las capas superiores de la corteza terrestre.

Aunque las propiedades físico-químicas de las aguas subterráneas son las mismas que las de las aguas superficiales, suelen existir unos rasgos diferenciales en lo que se refiere a la composición isotópica, y unas tendencias en lo que se refiere a su composición química y temperatura.

Vamos a recordar brevemente aquellas propiedades físicas y químicas del agua de las que derivan sus importantes y singulares funciones en los procesos geológicos.

Las propiedades físicas del agua

Un primer dato de interés es que algunas propiedades físicas del agua varían considerablemente dentro del rango usual de temperaturas de las aguas subterráneas.

a) *Propiedades térmicas*

Los tres estados del agua (sólido, líquido y vapor) sólo coexisten en equilibrio en relación con la presión y la temperatura en el denominado punto triple (0°C a la presión de 542 Pa). A temperaturas superiores, sólo hay líquido y vapor; a temperaturas inferiores, sólido y vapor. Cuando la presión del vapor de agua es inferior a la correspondiente a su temperatura, no hay equilibrio. Entonces, el agua o el hielo tienen que evaporarse —o sublimarse— hasta alcanzar esa presión de equilibrio o hasta que no quede agua líquida o sólida. Los puntos de congelación y ebullición (0°C y 100°C , respectivamente) para el agua pura a presión normal dependen de la presencia de solutos en el agua. Por ejemplo, el descenso crioscópico es de $1,82^{\circ}\text{C/molal}$, y el aumento del punto de ebullición, $0,5^{\circ}\text{C/molal}$, a la presión normal.

El valor del calor específico es muy elevado y varía relativamente poco con los cambios de presión y temperatura. Es de 1 caloría (4.2 J) por gramo de agua para aumentar su temperatura un grado centígrado. De ahí deriva el gran papel como estabilizador climático de las masas de agua marinas y, también, la importancia del flujo de agua subterránea en la transmisión de calor dentro de la corteza terrestre.

Al contrario que su calor específico, la conductividad térmica del agua ($5,7 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ a 25°C) es menor que la de la mayor parte de las rocas.

Recordemos que el calor latente de fusión/congelación o de vaporización/condensación es la energía que es necesario aportar/liberar para efectuar esos cambios de estado. A la presión normal, el primero tiene un valor de unas $80 \text{ cal} \cdot \text{g}^{-1}$; el segundo, unas $500 \text{ cal} \cdot \text{g}^{-1}$. Este elevado calor de vaporización hace, por ejemplo, que, en verano y en los climas semiáridos, las zonas de descarga de aguas subterráneas sean auténticos sumideros de energía calorífica y originen un agradable microclima, con mayor humedad y menor temperatura, que a su vez suele dar origen a la aparición de ciertos ecosistemas de singular valor. El papel que las aguas subterráneas juegan en la configuración del paisaje parece que sólo ha comenzado a considerarse en época muy reciente (cfr. Bernáldez et al., 1987).

b) *Propiedades mecánicas*

Como es bien sabido, a presión normal la mayor densidad del agua pura ($\delta = 1, \text{ g/cm}^3$) se produce a 4°C . Con el aumento de presión, el

punto de máxima densidad se desplaza ligeramente hacia temperaturas algo más bajas. Las variaciones de densidad con la temperatura puede llegar a reducir la densidad del agua un 4 por 100 a los 100 °C (fig. 1). El aumento de sales disueltas en el agua aumenta su densidad; así, por ejemplo, el agua de mar tiene una densidad de 1.025 (g/cm³). Tanto la salinidad como la temperatura de las aguas subterráneas suelen aumentar con su profundidad. Los efectos de estos dos factores sobre la densidad del agua son, pues, de signo contrario; los cambios de densidad con la profundidad pueden ser poco relevantes.

La compresibilidad del agua es relativamente pequeña (del orden de $5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$ ó $5 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{bar}^{-1}$) en comparación con la de las formaciones geológicas no consolidadas y varía poco con la temperatura (fig. 1). La compresibilidad del agua juega un papel importante en la transmisión de las variaciones de presión en los sistemas acuíferos confinados y, por tanto, en la compactación de los depósitos de las grandes cuencas sedimentarias y en los fenómenos de subsidencia debidos a la

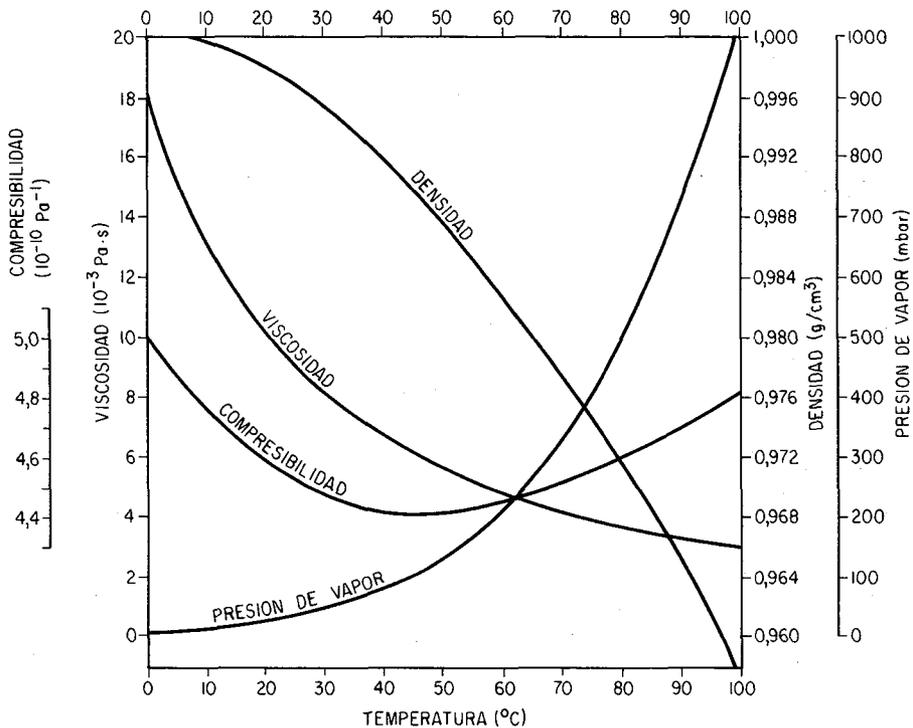


FIG. 1.—Características del agua dependientes de la temperatura (densidad, presión de vapor, viscosidad y compresibilidad). (Según Matthes, 1982.)

extracción de fluidos del subsuelo. En cambio, la viscosidad dinámica del agua varía notablemente con la temperatura (entre 1,7 y 0,3 mPa.s, para 0° y 90° C, respectivamente, ver figura 1). Este cambio en la viscosidad se traduce en un cambio similar en la permeabilidad y, en ocasiones, ha de tenerse en cuenta en las estimaciones de la velocidad de flujo en los grandes sistemas acuíferos.

La tensión superficial del agua sólo depende ligeramente de su temperatura; influye más en ella la naturaleza y tamaño de las partículas del esqueleto acuífero. La tensión superficial juega un decisivo papel en el movimiento del agua en la zona no saturada.

Las propiedades químicas del agua

Es obvio que no se va a tratar de hacer aquí un intento de síntesis de alguno de los recientes manuales publicados sobre la Química del Agua. Sin embargo, considero útil evocar algunos aspectos fundamentales.

Recordemos de nuevo que el agua es el disolvente más común y universal. Esta capacidad de disolución se debe a la estructura dipolar de la molécula de agua. En realidad, en la naturaleza el agua no está en forma de H₂O, sino polimerizada, formando agrupaciones de moléculas de H₂O cuyo número parece oscilar entre 90 a 0°C y 25 a 70°C, según Matthes (1982).

El agua natural disuelve gases de acuerdo con la Ley de Henry. Por lo general, los gases más frecuentes en las aguas subterráneas son los mismos que hay en la atmósfera (O₂, N₂, CO₂ y gases nobles), pero en diferentes proporciones. Dentro de la zona saturada, usualmente por procesos bioquímicos, pueden originarse otros gases, como NH₄, SH₂, CH₄, CO₂ y otros. Entre los gases disueltos en el agua, el CO₂ suele jugar el papel geoquímico más importante.

Como es bien sabido, el agua pura se disocia en una pequeña proporción en hidrogeniones (H⁺) e hidroxiliones (OH⁻). En agua pura a 25°C, la concentración de ambos es 10⁻⁷ mol/l. El agua disuelve —o reacciona con (hidrólisis)— la matriz sólida del suelo o del acuífero. A causa de estos procesos, se incorporan al agua numerosos solutos o especies químicas en forma de iones o de complejos o de moléculas no iónicas. La determinación de las diversas especies químicas que existen en una solu-

ción exige un largo proceso de cálculo que se resuelve esencialmente mediante la aplicación iterativa de la ley de masas; su solución es posible de modo práctico mediante el uso de ordenadores.

El problema, sin embargo, no es tan sencillo, pues existen todavía incertidumbres sobre algunos valores de los coeficientes termodinámicos que intervienen en las respectivas ecuaciones. Estas incertidumbres son todavía mayores cuando se trata de los problemas relacionados con la disolución de líquidos en líquidos y especialmente en el caso de los casi innumerables compuestos orgánicos que la industria química crea y lanza al mercado de modo creciente.

El conocimiento de los procesos de disolución, transporte, reacciones bioquímicas e inorgánicas, etc., que experimentan los compuestos tóxicos orgánicos en las aguas subterráneas es uno de los problemas más candentes que tiene hoy planteada la Hidrogeología en aquellos países desarrollados que son conscientes de la necesidad de proteger sus recursos hidráulicos subterráneos contra la contraminación.

Se ha dicho antes que esos procesos se estudian esencialmente mediante la aplicación de ecuaciones basadas en la ley de acción de masas. Esta aplicación presupone la aceptación de la hipótesis de que el agua subterránea ha alcanzado el equilibrio químico. Sin embargo, hay evidencias de que en ciertos casos este equilibrio no se alcanza. En efecto, a pesar de la usual lentitud del flujo del agua subterránea (lo normal son velocidades de unos cuantos cm/día que pueden implicar tiempos de residencia en el acuífero de cientos o miles de años), algunas reacciones son tan lentas que es necesario estudiarlas teniendo en cuenta las leyes de la cinética química y no sólo la hipótesis simplificadora del equilibrio químico. Los estudios específicos disponibles por ahora en este campo son escasos (Langmuir and Mahoney, 1984).

Las reacciones de oxidación-reducción, frecuentemente relacionadas con complejos procesos bioquímicos, están siendo objeto de estudios detallados en los últimos años. Algo similar puede decirse en lo que se refiere al también complejo tema de los procesos de adsorción y cambio iónico que constituyen un aspecto fundamental del campo más amplio de las relaciones roca-agua. Como índice de la relevancia de este último tema, cabe mencionar que la International Association of Geochemistry and Cosmochemistry constituyó hace años un grupo de trabajo sobre este tema que ha organizado ya cinco simposios específicos, el último en Islandia, en el verano de 1986.

Finalmente, no parece ocioso recordar la importancia progresivamente creciente que, desde la década de los cincuenta, tienen los estudios de la composición isotópica del agua y de las sustancias en ella disueltas. Estos estudios, en no pocos casos, proporcionan datos inestimables sobre el tiempo de residencia y el origen del agua. Los isótopos más analizados hoy son: ^2H , ^3H , ^{18}O , ^{13}C y ^{14}C ; en general, con menor frecuencia: el ^{34}S , ^{18}O en SO_4 , ^{15}N y ^{36}Cl . Sin duda, la lista de isótopos útiles en hidrogeología está todavía abierta y se continuará enriqueciendo en los próximos años.

Con estas breves explicaciones he intentado presentarles un rápido bosquejo —que deseo no haya resultado una caricatura— de las singulares propiedades que tiene esa omnipresente sustancia que llamamos agua; espero también que haya quedado patente que hay todavía bastantes aspectos, tanto de la Física como de la Química del agua que no son suficientemente conocidos; pero, sobre todo, confío en que este simple bosquejo sirva de fundamento para entender mejor los tres apartados siguientes de mi disertación, que se van a referir sucesivamente a la cuantificación del ciclo hidrológico, a las necesidades de investigación en relación con el aprovechamiento y protección del agua subterránea como recurso económico-ecológico y, finalmente, al agua subterránea como factor de ciertos procesos geológicos.

LA CUANTIFICACION DE FASES Y FLUJOS DEL CICLO HIDROLOGICO EN ESPAÑA

Como previamente se dijo, la concepción actual del Ciclo Hidrológico, al menos en sus principios básicos, fue establecida hace algo más de tres siglos. Sin embargo, el análisis cuantitativo aproximado de las distintas fases del agua en la Hidrosfera y de los movimientos o flujos entre esas distintas fases sólo se ha realizado hace un par de décadas y, sin duda, queda todavía mucho camino por recorrer en esta línea de investigación.

El Decenio Hidrológico Internacional (DHI) promovido por la UNESCO entre los años 1965 y 1974, constituyó una feliz iniciativa científica que contribuyó notablemente al mejor conocimiento del ciclo hidrológico mundial. En 1975 la UNESCO decidió continuar la labor del DHI mediante el Programa Hidrológico Internacional (PHI) que en estos momentos está en su tercera fase. Cada fase dura cinco años.

Entre los logros del DHI, interesa mencionar ahora el establecimiento de un inventario general de las cantidades de agua que existen en cada ámbito de la Hidrosfera, así como de los flujos de agua entre esos ámbitos. Con ambos datos se obtiene una estimación del tiempo medio de residencia de una partícula de agua en cada uno de dichos ámbitos o fases de la Hidrosfera. Esta tarea fue impulsada, en buena parte, por los hidrólogos rusos y de modo especial por L'vovitch quien, en su obra "World Water Resources and their Future", publicada en inglés en 1979, resumió el estado de la cuestión a finales del Decenio Hidrológico Internacional.

La tabla 1 —ya más o menos clásica con ligeras variantes— reproduce una distribución del agua y de los tiempos de residencia en cada fase del ciclo. La tabla 2 sintetiza la distribución de los componentes principales del Ciclo Hidrológico a nivel mundial, en Europa, Africa, Rusia y España según diversos autores, especialmente de la escuela rusa. Conviene

TABLA 1.—Distribución del agua en la Hidrosfera (según varios autores en Custodio y Llamas, 1976, pág. 269).

	Área (km ² ×10 ³)	Volumen (km ³ ×10 ³)	Altura equivalente (m)	% del agua total	Tiempo de residencia medio
<i>Océanos</i>	362.000	1.350.000	2.700	97,6	3.000 años
<i>Tierras emergidas</i>					
Ríos (volumen instantáneo)	—	1,7	0,003	0,0001	15-20 días
Lagos de agua dulce	825	125	0,25	0,009	10 años
Lagos de agua salada	700	105	0,20	0,008	150 años
Humedad del suelo en la zona no saturada	131.000	150	0,30	0,01	semanas a años
Casquete de hielo y glaciares	17.000	26.000	50	1,9	miles de años
Agua subterránea	131.000	7.000	14	0,5	decenas a miles de años
Total en las tierras emergidas	148.000	33.900	65	2,4	—
<i>Atmósfera</i> (vapor de agua)	510.000	13	0,025	0,001	8-10 días
Total	510.000	1.384.000	2.750	100	—

tener en cuenta que a las cifras de la tabla 2 —a pesar de su indudable interés— sólo puede concedérseles un valor global y aproximado. Así por ejemplo, L'vovitch (1979, pág. 250) estima que los valores correspondientes para España son: P=321; E=129; ES=48; ED=81; H=240; ET=192 (todo ello en km³/año). En resumen, el hidrólogo ruso considera que la escorrentía total española es superior a la estimada por nosotros (95 km³/año) y que su componente subterráneo es del orden del 40 por 100, en vez de ser del orden del 25-30 por 100. Esto es debido tanto a la falta de precisión de las medidas de los datos de campo como a los

TABLA 2.—Balance Anual de Recursos Hidráulica continentales. (Según diversos autores en Custodio y Llamas, 1976, pág. 272).

	Global (148.10 ⁶ km ²)		Europa (9,8.10 ⁶ km ²)		Africa (30,5.10 ⁶ km ²)		Rusia (21,9.10 ⁶ km ²)		España (0,49.10 ⁶ km ²)	
	km ³	mm	km ³	mm	km ³	mm	km ³	mm	km ³	mm
P Precipitación	108.400	730	7.025	714	20.800	683	10.960	500	331	670
E Escorrentía total	38.150	260	2.950	300	4.220	139	4.350	198	95	190
ES Escorrentía subterránea (estable)	12.000	81	1.000	102	1.460	48	1.020	46	30	60
ED Escorrentía directa (crecidas)	26.150	179	1.950	198	2.760	91	3.330	152	65	130
H Humedecimiento total del suelo real	83.250	551	5.075	516	18.040	592	7.630	348	266	540
ET Evapotranspiración	70.250	470	4.075	414	16.580	544	6.610	302	236	470

diferentes métodos generalmente empleados para definir algunos de esos componentes (p. ej., métodos hidrometeorológicos convencionales para el cálculo de la evapotranspiración; separación del componente superficial y subterráneo mediante análisis de los hidrogramas de caudales de los ríos). Por ello, esas cifras globales y de carácter aproximado, si se utilizan de modo simplista, suelen conducir a conclusiones erróneas.

Esto es lo que, en cierto modo, parece haber ocurrido en la política hidráulica española de los últimos lustros. En efecto, con notable frecuencia ha aparecido en artículos y comunicaciones del Gobierno la afirmación de que los ríos españoles llevan cada año al mar —o a la frontera portuguesa— una aportación media de unos 100 km³ y que de esa aportación fluvial algo menos del 20 por 100 es de origen subterráneo; el resto es de origen superficial. Me parece interesante ocupar unos minutos su atención exponiendo brevemente el origen y evolución del “famoso 20 por 100” del componente subterráneo de nuestros ríos.

Dentro del II Plan de Desarrollo se constituyó una Comisión de Recursos Hidráulicos de la que fui uno de sus numerosos vocales. Por aquellos años, mediados de la década de los sesenta, mis colegas de la Comisión de Recursos Hidráulicos, probablemente sin excepción, pensaban que las aguas subterráneas eran todavía poco conocidas y, de hecho, incuantificables. Como no estaba de acuerdo con esa apreciación, presenté a la Comisión una estimación preliminar del desglose del Ciclo Hidrológico en España, que incluía, por supuesto, el componente subterráneo. Esos valores se basaban simplemente en el principio de la unidad del ciclo hidrológico, en los valores oficiales de las aportaciones totales de las diez cuencas hidrográficas españolas estimados por la Dirección General de Obras Hidráulicas y en las características climáticas y geológicas generales de esas mismas cuencas. Mi estimación no fue considerada adecuada por otros vocales de la Comisión y, de hecho, no figuró en el documento final aprobado por la Comisión de Recursos Hidráulicos y posteriormente publicado oficialmente por el Gobierno en 1967.

No obstante, convencido del interés de mi mencionado trabajo *como estudio preliminar* decidí publicar esos datos (Llamas, 1967) pero no sin advertir que esas cifras sólo podían considerarse como una primera aproximación y bien pudiera ocurrir que el componente subterráneo fuese el doble o la mitad del estimado. Posteriormente el Instituto Geológico y Minero hizo nuevos estudios —tampoco demasiado detallados— y obtuvo unas cifras similares (Coma, 1974). Más recientemente el MOPU (1982), con motivo de la elaboración de los planes hidrológicos, iniciados en

1979, también ha publicado otras estimaciones sin indicar, al menos hasta la fecha, la metodología seguida para su obtención. En la tabla 3 se presenta un resumen con las cifras de los tres trabajos citados. Puede apreciarse que las diferencias entre las cifras de los tres trabajos son pequeñas. Desgraciadamente, esa coincidencia no constituye una garantía de calidad; más bien parece indicar que todavía hay que dedicar más esfuerzo para conocer mejor los componentes del ciclo hidrológico en España. En la figura 2 se presentan en forma gráfica los valores específicos de los componentes del Ciclo Hidrológico en las diez cuencas peninsulares.

Con base en esos datos, sólo aproximados, el Centro de Estudios Hidrográficos (CEH) (Martín Mendiluce, 1975) elaboró y publicó un informe sobre el “papel real” de las aguas subterráneas en España. En él, como conclusión sintética y general, se daba a entender que el papel de las aguas subterráneas era prácticamente irrelevante para el conjunto de la política hidráulica española. No es ahora el momento adecuado para repetir dónde están, en mi opinión, los presupuestos que condujeron a esa conclusión desenfocada. Remito al lector interesado a otros trabajos míos (Llamas, 1983, 1984a). Sin embargo, parece interesante tener en cuenta que, desde su creación en la década de los cincuenta hasta hace muy poco, el Centro de Estudios Hidrográficos fue el punto de apoyo fundamental para la formulación de la política hidráulica española.

Tabla 3.—Estimación de recursos hídricos naturales de la España peninsular (en hm³/año)

	Escorrentía superficial			Escorrentía subterránea a los ríos			Escorrentía subterránea total			Escorrentía total de los ríos			Escorrentía total			Flujo subterráneo al mar		
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
Norte	32.000	37.270	37.276	5.500	5.480	4.100	37.500	42.750	43.376	37.500	42.750	43.376	37.500	42.750	43.376	1.100	1.100	1.500
Duero	8.150	12.520	10.720	3.000	1.430	1.450	11.150	13.950	12.170	11.150	13.950	12.170	11.150	13.950	12.170	—	—	—
Tajo	7.525	8.140	7.985	1.700	2.160	2.200	9.225	10.300	10.185	9.225	10.300	10.185	9.225	10.300	10.185	—	—	—
Guadiana	3.895	5.140	4.360	1.000	710	700	4.895	5.850	5.060	4.895	5.850	5.060	4.895	5.850	5.060	60	60	50
Guadalquivir	4.900	6.440	6.934	1.800	2.250	2.100	6.600	8.700	9.034	6.600	8.700	9.034	6.600	8.700	9.034	600	600	200
Sur	1.900	2.200	1.940	250	900	450	2.150	3.100	2.390	2.150	3.100	2.390	2.150	3.100	2.390	300	300	440
Segura	580	390	450	300	510	500	880	900	950	880	900	950	880	900	950	160	160	10
Júcar	2.250	1.440	1.868	700	2.460	1.200	2.950	3.900	3.066	2.950	3.900	3.066	2.950	3.900	3.066	800	800	1.300
Ebro	14.000	15.580	15.191	3.400	3.120	3.050	17.400	17.700	18.241	17.400	17.700	18.241	17.400	17.700	18.241	80	80	100
Pirineo Oriental	1.200	1.160	2.300	500	940	250	1.700	2.100	2.550	1.700	2.100	2.550	1.700	2.100	2.550	250	250	700
TOTALES	76.300	89.280	91.022	18.150	19.970	16.000	94.450	109.250	107.022	94.450	109.250	107.022	94.450	109.250	107.022	3.350	3.350	4.300

OBSERVACIONES: (1) Según Llamas (1967)

(2) Según Coma (1974). La escorrentía subterránea incluye también el flujo subterráneo al mar

(3) Según MOPU (1982)

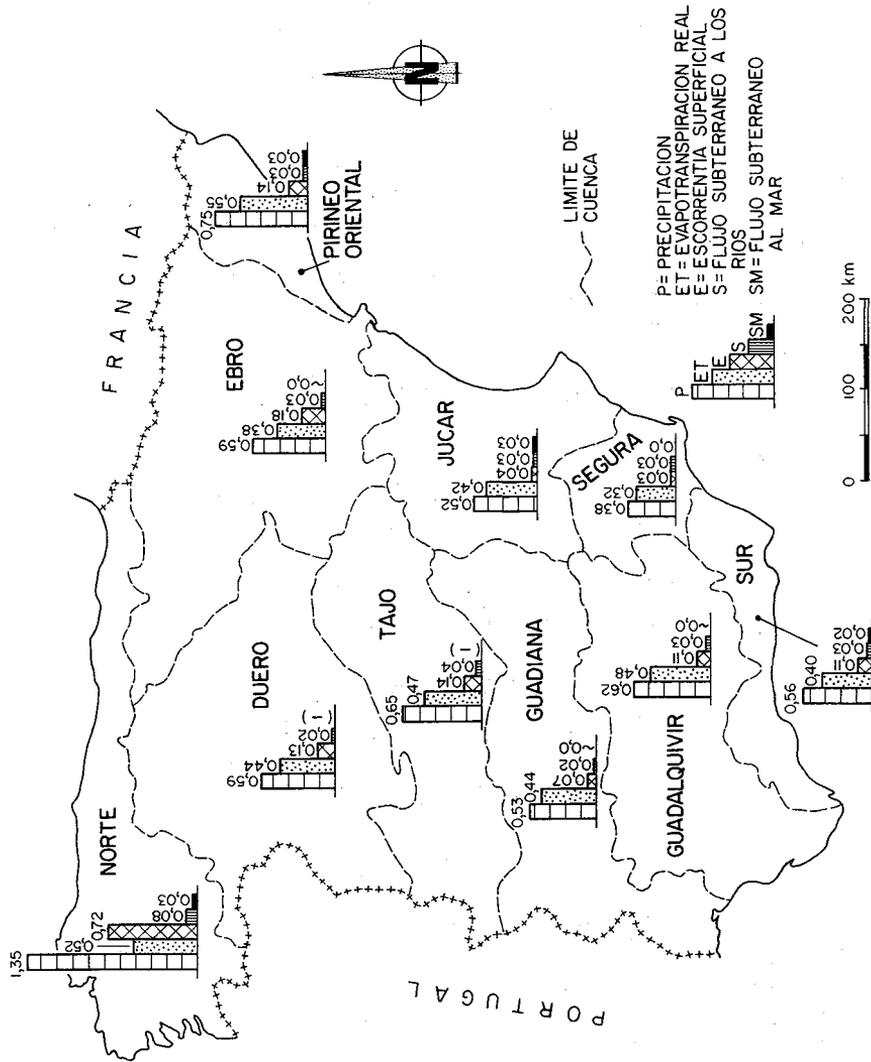


Fig. 2.—Componentes principales del Ciclo Hidrológico en las cuencas hidrográficas (en m/año).

LA INVESTIGACION HIDROGEOLOGICA EN RELACION CON EL APROVECHAMIENTO Y LA PROTECCION DEL AGUA SUBTERRANEA EN ESPAÑA

Como previamente se dijo, la gran mayoría de los hidrogeólogos del mundo trabajan como profesionales o como científicos en temas relacionados con el aprovechamiento o la conservación de las aguas subterráneas. Probablemente ésta va a continuar siendo la situación durante bastantes años, incluso en los países que dedican un considerable esfuerzo a la investigación fundamental (Llamas, 1987a). Por lo que a España se refiere, esa gran mayoría de hidrogeólogos dedicados al estudio del agua subterránea como recurso económico prácticamente pasa a ser la totalidad. Sin embargo, sería deseable que pronto existiera también en nuestro país un cierto número de investigadores dedicados al desarrollo de la Hidrogeología como factor fundamental de algunos procesos geológicos, tema que será tratado más adelante.

En este apartado voy a tratar de la situación actual de la investigación hidrogeológica en España, de lo que me parecen sus necesidades futuras y de algunos posibles modos de atenderlas. Naturalmente, nuestro mundo científico no está aislado del de otros países, sino que cada día está más relacionado con la comunidad científica internacional. Por ello, con cierta frecuencia será obligada la referencia a lo que ocurre en otros países con mayor experiencia en estos temas.

Por otra parte, dado que ahora vamos a tratar de la investigación en relación con el aprovechamiento y conservación de las aguas subterráneas en nuestro país, me ha parecido obligado presentar previamente una breve panorámica de los usos del agua subterránea en España, de los principales problemas actuales y de marco jurídico-institucional en el que deben desarrollarse estas tareas de investigación.

Usos del agua en España

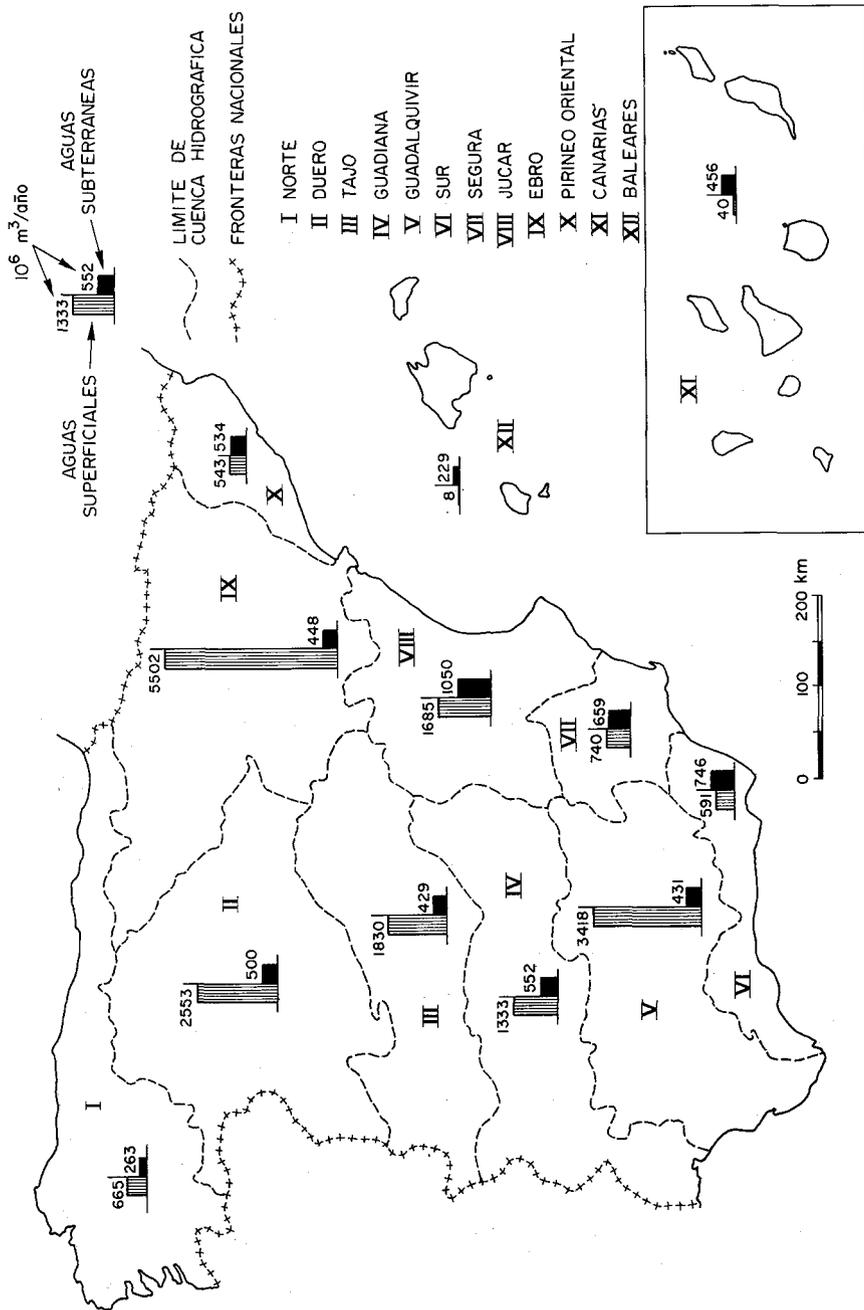
En la tabla 4 se resumen los usos del agua para el conjunto del país, distinguiendo entre agua aplicada y agua consumida. Agua aplicada es la que se lleva o aplica para ese uso determinado; no toda ella es realmente consumida —por ejemplo, transformada en vapor de agua— y por tanto, en una mayor o menor proporción vuelve a los ríos o acuíferos. La relación entre el agua consumida y el agua aplicada suele ser mucho mayor en los regadíos que en los abastecimientos urbanos. En la figura 3 se representan de modo gráfico los volúmenes anuales de aguas superficiales y subterráneas “aplicadas” en las diez cuencas hidrográficas y en los dos archipiélagos.

TABLA 4.—Usos de agua dulce en España (en km³/año) (según Llamas y Coletto, 1984).

	1975		1980	
	Subterránea	Superficial	Total	Total
A. AGUA APLICADA				
1. Abastecimiento	1,3	2,3	3,6	5,2
2. Regadíos	4,9	16,6	21,5	22,6
3. Total	6,2	18,9	25,1	27,8
B. AGUA CONSUMIDA				
1. Abastecimiento	0,9	1,1	2,0	3,2
2. Regadíos	3,9	13,3	17,2	19,9
3. Total	4,8	14,4	19,2	23,1

Como en tantos otros países, la estadística española de usos del agua dista todavía mucho de tener el grado de aproximación que sería deseable. No obstante, Llamas y Custodio (1985) basándose en los datos disponibles, llegaron a las siguientes conclusiones: *a*) el regadío constituye, con mucho, el principal uso consuntivo del agua (85-90 por 100); *b*) sólo un tercio de los abastecimientos urbanos españoles se abastecen con aguas subterráneas (ésta parece ser la proporción más baja de Europa, con la excepción de Noruega); y *c*) el regadío con aguas subterráneas supone un uso de agua del orden de la tercera o cuarta parte del total de agua utilizada para este fin.

Una consideración simplista de esas cifras generales podría llevar a minusvalorar la importancia económica actual de las aguas subterráneas en España. Así, por ejemplo, en las regiones insulares el agua subterránea es prácticamente el único recurso hídrico disponible en la actualidad; y en las áreas mediterráneas cubre aproximadamente la mitad de los usos consuntivos. De modo singular, en las islas Canarias, el agua subterránea



es un recurso de interés prioritario en la vida económico-política de esta Región Autónoma (Custodio, 1987a). Por otra parte, también es importante tener en cuenta que el producto económico de una hectárea de regadío puede variar hasta cincuenta o más veces, según las zonas y los tipos de cultivo; desde casi diez millones de pesetas/año en cultivos con invernaderos en el Sur hasta menos de 200.000 pesetas en amplias zonas de duro clima meseteño. Además, el ahorro de energía conduce a que las dotaciones de riego en los regadíos con aguas subterráneas, en general, sean menores que en los regadíos tradicionales que utilizan aguas superficiales. Estos factores nos han llevado a estimar de modo preliminar que más de la mitad del valor económico de la producción agropecuaria vinculada a los regadíos procede de los regadíos con aguas subterráneas, aun cuando el volumen de agua aplicada en esos regadíos sea netamente inferior al empleado en los regadíos con aguas superficiales.

No querría terminar estas breves notas sobre los usos del agua en España sin destacar que me he referido solamente a los dos usos tradicionales (abastecimiento y regadío) de los que existen datos aceptables. En otros trabajos anteriores (cf. Llamas, 1984 a y b) ya anuncié que, probablemente, en un futuro próximo la política hidráulica nacional no sólo tendrá que considerar el agua como un recurso económico, sino también como un elemento fundamental para la conservación del medio ambiente. Este proceso ya es patente en otros países más industrializados y parece que esa tendencia se acentuará en los próximos años (cf. Margat, 1987; Raoul, 1987). La nueva ley de Aguas españolas ha puesto unas bases que pueden facilitar la aplicación de esta nueva escala de valores (Llamas, 1987b).

Dialéctica aguas superficiales-aguas subterráneas

Como ya se ha dicho, España, a pesar de ser en buena parte un país semiárido y de estar dotado de acuíferos importantes, ha hecho —y, en general, todavía hace— un uso relativamente modesto de sus recursos de agua subterránea, al menos en comparación con otros países avanzados de similares condiciones climáticas e hidrogeológicas. La causa fundamental de esta situación radica, probablemente, en la actitud de gran parte de los que han dirigido la política hidráulica desde hace muchos años. Esa actitud les ha llevado a separar o escindir radicalmente lo que se refiere a las aguas superficiales de lo que atañe a las aguas subterráneas, en general, con olvido de estas últimas. Dicha postura existía —y existe— en no pocos países, y en 1972, fue denominada “hidroesquizofrenia” por

R. Nace, un hidrólogo americano. Como prueba de que dicha mentalidad parece persistir claramente en el "Corps of Engineers", la institución que de modo principal impulsa y desarrolla la política hidráulica federal de los EE.UU., puede verse el reciente artículo de Raoul (1987) sobre el pasado, presente y futuro de los recursos hidráulicos. La mención del papel de las aguas subterráneas es prácticamente inexistente excepto en el último párrafo del citado artículo. Afortunadamente para el pueblo norteamericano, el papel del gobierno federal de los EE.UU. es proporcionalmente inferior al que suelen tener los gobiernos centrales de los países europeos. De hecho, los estados, los municipios y los particulares han desarrollado una intensa explotación de aguas subterráneas al margen de la política seguida tanto por el Corps of Engineers como por el Bureau of Reclamation, la otra gran institución federal americana que se ocupa de los megaproyectos hidráulicos.

En 1973, inspirado en el vocablo de Nace, realicé un primer análisis de dicha "enfermedad", la hidroesquizofrenia en España. Estudié entonces las causas del mal, propuse un tratamiento para su curación e incluso aventuré un pronóstico de la evolución de esta "enfermedad" en España. Desde 1973 hasta ahora he vuelto a considerar el tema en sucesivos trabajos publicados en España y fuera de España (puede verse un resumen de ellos en Llamas, 1983). Las causas de la "enfermedad" fueron clasificadas en los grupos siguientes: 1) el déficit de adecuados conocimientos científicos y tecnológicos en Hidrogeología; 2) los criterios de asignación de ayudas económicas estatales para los aprovechamientos de recursos hidráulicos; 3) la legislación de aguas; 4) la organización administrativa e institucional; 5) los aspectos políticos, en su sentido más amplio, y 6) los sucesivos y frecuentes "fracasos", desde hace casi dos siglos, de los intentos de ampliar las captaciones de aguas subterráneas de Madrid para atender la creciente demanda de agua de la capital de España. Las cinco primeras, en mayor o menor proporción, son causas comunes de "hidroesquizofrenia" en muchos países; la sexta, evidentemente, corresponde en exclusiva a España. No hay tiempo ahora para comentar, ni siquiera brevemente, el problema del abastecimiento de Madrid y las causas científicas y tecnológicas de los fracasos en los intentos de solucionarlo a base de aguas subterráneas. Tampoco parece ahora el momento adecuado para analizar las circunstancias culturales y socio-políticas que magnificaron esos "fracasos" y dieron origen a un caso de "grave hidroesquizofrenia" en España. Remito al lector interesado en mayor detalle a otros trabajos míos anteriores (Llamas, 1976, 1983).

De modo quizá muy esquemático puede resumirse la situación diciendo que los sucesivos fracasos de abastecer Madrid con aguas subterráneas

llevaron a los responsables de la política hidráulica a la convicción de que las aguas subterráneas, a efectos prácticos, constituían un recurso de poca utilidad.

El 1 de enero de 1986 entró en vigor una nueva Ley de Aguas que ha declarado de dominio público las aguas subterráneas y ha mantenido el carácter público que las aguas superficiales ya tenían en la legislación anterior. Los órganos para la gestión de las aguas de dominio público, denominados Organismos de Cuenca van a continuar dependiendo, excepto en los archipiélagos y en la Cuenca del Pirineo Oriental, de modo directo de la Dirección General de Obras Hidráulicas (DGOH).

Parece lógico suponer que la nueva Ley de Aguas debería terminar con la dialéctica aguas superficiales-aguas subterráneas en un plazo prudencial. Todavía es pronto para emitir un juicio fundado sobre la eficacia de la nueva Ley. No obstante, hay algunos indicios que no parecen invitar al optimismo (cf. Llamas, 1987b).

Causas del reciente desarrollo de la explotación de aguas subterráneas en España

Posiblemente alguno se pregunte hasta qué punto es correcta mi aseveración de que, en conjunto, la DGOH ha seguido una política hidráulica basada casi exclusivamente en obras hidráulicas superficiales, puesto que en no pocas zonas de España las aguas subterráneas son tan activamente explotadas que, al parecer, están dando origen a serios problemas de distintos tipos. Hay algunos hechos que pueden explicar esta situación.

En primer lugar, a pesar del centralismo administrativo, España todavía no ha tenido, afortunadamente, un gobierno tan "orwelliano" que haya podido anular la iniciativa privada o de los entes sociales menores, como son los municipios. Por otra parte, la explotación de aguas subterráneas tiene una multiseccular tradición en España y de modo principal en las zonas mediterráneas, donde entidades privadas y municipios han explotado las aguas subterráneas al margen de la política hidráulica del gobierno central. Alguna vez he escrito que si la capital de España hubiera estado en Valencia o Barcelona, donde existen acuíferos más fáciles de explotar que el de Madrid, probablemente hubiéramos tenido otra política hidráulica, aun cuando hubiera existido el mismo sistema administrativo centralizado.

Ahora bien, el incremento notable en la explotación de aguas subterráneas que ha tenido lugar en las dos últimas décadas, tanto en áreas con cierta tradición en su uso, como Murcia y Valencia, como en áreas previamente poco explotadas, como las dos mesetas castellanas, se debe, en gran parte, a la mejora en las técnicas de perforación de pozos y especialmente a la popularización de la bomba de turbina. En cierto modo, tanto en España como en otros países, la “revolución” en el uso de las aguas subterráneas se debe tanto o más a los avances de la Mecánica Hidráulica que a los de la Hidrología Subterránea.

A partir de la década de los sesenta, se iniciaron en España los estudios regionales o de infraestructura hidrogeológica con criterios modernos. Estos estudios se desarrollaron desde dos núcleos distintos. Por un lado, desde las oficinas de la Dirección General de Obras Hidráulicas en Barcelona; por otro, desde el Instituto Geológico y Minero de España que, junto con la FAO, comenzó el Estudio Hidrogeológico de la Cuenca del Guadalquivir. Estos dos estudios tuvieron la virtud de crear sendos equipos de jóvenes ingenieros y geólogos que luego han aplicado esa tecnología a otras muchas zonas y, además, han sabido transmitir sus conocimientos a otros equipos. Sin duda, esta situación también ha sido una positiva contribución para el desarrollo en la explotación de las aguas subterráneas.

“Problemas” en relación con las aguas subterráneas

Durante los años 1983 a 1985, con motivo de la campaña oficial para facilitar en los medios rurales la aceptación de la pérdida de carácter privado de las aguas subterráneas en la nueva Ley de Aguas, con notable frecuencia se difundieron en los medios de comunicación (también denominados medios de persuasión) noticias sobre los “graves” problemas a que había llevado la explotación incontrolada de las aguas subterráneas. El énfasis fundamental se puso en dos tipos de problemas: la sobre-explotación y la intrusión marina. Ambos tipos de problemas existían, existen y, probablemente, van a continuar existiendo durante cierto tiempo. No obstante, en mi opinión, la mencionada campaña los magnificó hasta convertirlos en un auténtico mito hidráulico (Llamas, 1984b). Una vez aprobada la Ley —y declaradas de dominio público las aguas subterráneas— parece como si esos problemas casi hubieran desaparecido, a juzgar por la relativa escasez de noticias sobre ellos en los medios de comunicación (o persuasión).

Además, hay que tener en cuenta que todavía, por inercia, no se han disipado totalmente los ecos de la campaña antidemográfica que se había orquestado a nivel mundial en la década pasada y principios de la presente. Una parte de esa campaña consistía en atribuir al aumento de la población los problemas de contaminación o de la futura escasez de recursos. Ya hace algún tiempo se alzaron algunas voces, como la de Simon (1980), que no sólo hicieron ver la inconsistencia científica de muchas de esas predicciones de inminentes plagas apocalípticas, sino que sostuvieron —y sostienen— que el crecimiento de la población es a medio plazo el principal elemento para la mayor disponibilidad de recursos naturales y, en general, para el progreso del mundo.

No es ahora el momento para tratar del problema de la limitación o escasez o abundancia de los recursos naturales. Basta, quizá, decir que, en mi opinión, en España no tiene por qué haber problemas significativos de escasez de agua, siempre que nuestra política hidráulica sepa aprovechar los conocimientos de la ciencia y la tecnología modernas.

A continuación se va a presentar una síntesis de los principales problemas de las aguas subterráneas en España, basada en buena parte en un trabajo todavía inédito (Llamas y Custodio, 1988).

a) *Intrusión marina en acuíferos costeros*

Es frecuente y afecta a todo tipo de acuíferos en la costa mediterránea y en los archipiélagos. Se debe tanto a bombeos excesivos como a pozos mal ubicados. A veces, no es una auténtica intrusión de agua marina, sino la movilización de aguas salinas congénitas que rellenan los poros de algunos acuitardos dentro de los sistemas acuíferos costeros.

b) *Contaminación areal o difusa de acuíferos*

Su principal efecto perjudicial es el aumento de nitratos como consecuencia del uso, probablemente extemporáneo y excesivo, de fertilizantes nitrogenados en las actividades agrícolas. En amplias zonas de regadío las aguas subterráneas infrayacentes tienen concentración de NO_3 superiores a 100 ppm, que es doble de lo que permite el código sanitario español para que un agua sea potable. Los problemas relacionados con las lluvias ácidas apenas han sido estudiados, pero probablemente no tienen tanta importancia como en otros países más industrializados y con menor abundancia de suelos calcáreos.

c) *Contaminación de acuíferos por focos puntuales.*

Como es sabido, este tipo de contaminación se debe a distintas causas (vertederos de residuos sólidos industriales o urbanos, balsas con líquidos contaminantes, fugas de depósitos de líquidos tóxicos o de hidrocarburos, etc.). Constituyen un amplio y variado grupo de problemas. Quizá la tarea más urgente es la de identificar e inventariar estos problemas y establecer una prioridad para su resolución.

Quizá sea ésta una de las tareas que nuestro país tiene más retrasadas. El análisis de este tipo de contaminación de aguas subterráneas, impulsado con fuerza en los EE.UU. desde comienzo de la década de los setenta, fue probablemente el que más contribuyó a poner de relieve la necesidad de proteger las aguas subterráneas contra la contaminación y de destinar a ello los adecuados recursos. Moore (1986) indica que en los últimos años se han clausurado en los EE.UU. más de 3.000 pozos de abastecimientos públicos o privados, por estar contaminados; el gobierno de ese país ha aprobado para el período 1986-1991 un presupuesto especial, denominado "Superfund", de casi 9.000 millones de dólares —aproximadamente un billón (10¹²) de pesetas— para limpiar o rehabilitar acuíferos contaminados por residuos tóxicos; es decir, un presupuesto del mismo orden de magnitud que toda la inversión pública española en investigación de todo tipo durante los próximos cinco o diez años. La puesta en práctica de la Ley del "Superfund", que tuvo una primera etapa de 1980 a 1985 con un presupuesto de 1.600 millones de dólares, ha servido para poner de manifiesto que el problema era más serio de lo inicialmente supuesto. Así, por ejemplo (cf. Anónimo, 1987), en 1980 se estimó que había *grosso modo* unos 9.000 emplazamientos o vertederos potencialmente peligrosos: a finales de 1986 esta cifra pasó a ser de 25.000 habiéndose ya realizado la investigación preliminar de 20.000 de ellos. De estos, casi mil habían sido incluidos en la National Priority List (NPL); aproximadamente en la mitad de estos últimos ya se había realizado la investigación detallada y los planes de acción correctora. Se estima que la aplicación de estos planes correctores o de limpieza va a exigir un período de 5 a 10 años por emplazamiento. Quizá uno de los aspectos más interesantes de la actual Ley del "Superfund" es que autoriza subvenciones para asistencia técnica de modo que los ciudadanos puedan contratar expertos para conocer mejor la complejidad de la eliminación de los residuos peligrosos y de las soluciones propuestas por el programa "Superfund". Como consecuencia de este hecho y de otros similares, existe hoy en los EE.UU. un claro déficit de hidrogeólogos.

La situación en nuestro país, donde la sensibilidad por los problemas

de salud pública y de protección del medio ambiente es todavía relativamente reducida, dista mucho de la americana, pero convendría acortar distancias lo antes posible. De hecho, el Reglamento de nuestra Ley de Residuos Tóxicos todavía no ha sido aprobado.

d) *Contaminación por residuos radiactivos*

En este tema, nuestro distanciamiento con respecto no sólo a los EE.UU. y Canadá, sino a cualquier país europeo occidental con una producción de residuos nucleares análoga o incluso inferior a la española, parece no ya sólo grande sino claramente excesivo. En mi opinión, expuesta no hace mucho en los medios de comunicación con motivo de una polémica sobre la Fábrica de Uranio de Andújar (cf. YA, 23 de marzo y 7 de abril de 1987), este distanciamiento se refiere no sólo a los planteamientos científicos y tecnológicos, sino también a una postura de falta de transparencia informativa a la comunidad científica y al público en general por parte de las entidades con competencias oficiales en el tema de los residuos radiactivos.

Es indudable que el tema de la correcta gestión de los residuos radiactivos exige la realización de importantes y detallados estudios hidrogeológicos todavía no realizados —y quizá ni siquiera iniciados— en España. También es claro que todo lo relacionado con los temas nucleares tiene múltiples facetas políticas, económicas, ecológicas, incluso emocionales que, sin duda alguna, trascienden sus puras dimensiones científicas. Ahora bien, me parece casi obvio que si las instituciones responsables —fundamentalmente el Consejo de Seguridad Nuclear y ENRESA— no adoptan en este tema y en especial en lo que se refiere a la participación de la sociedad, tácticas y estrategias análogas a las de los demás países europeos occidentales, la problemática de los residuos nucleares puede convertirse en breve plazo en un espinoso y difícil problema político y social.

e) *Sobreexplotación de acuíferos*

La sobreexplotación de acuíferos sólo parece existir en zonas limitadas del SE español, de La Mancha y de Canarias. En esas zonas parece urgente promover —o establecer obligatoriamente— comunidades de usuarios, pues ésta es, probablemente, la única solución práctica del problema. Hasta ahora, la acción gubernamental en orden a facilitar y fomentar la

existencia de estas Comunidades de Usuarios de aguas subterráneas parece más bien tímida. La creación y gestión de esos acuíferos sobreexplotados va a exigir, con toda probabilidad, la realización de estudios hidrogeológicos mucho más refinados.

f) *Desecación de Humedales*

Casi todos los humedales españoles (marismas, tablas, aiguamolls, etc.) se ubican en zonas de descarga de aguas subterráneas (cf. Custodio, 1987). Los bombeos en el acuífero de La Mancha han provocado ya un serio impacto en las Tablas de Daimiel y parece probable que algo similar va a ocurrir en parte del Parque Nacional de Doñana a causa de los bombeos del Plan de Riegos de Almonte-Marismas (Rodríguez Arévalo-Llamas, 1986; Llamas y col., 1987). Estos son quizá los dos casos más espectaculares, pero pueden existir bastantes más.

g) *Otros problemas*

Sin duda, existen otros múltiples problemas relacionados con las aguas subterráneas que, por ahora, son poco conocidos o poco importantes en España. Entre ellos, cabe mencionar la salinización de suelos, la subsidencia del terreno, el ascenso no esperado del nivel freático en zonas urbanas y la contaminación térmica.

Las bases científicas para resolver los “problemas”

No voy a tratar aquí de demostrar la necesidad imperiosa de aumentar el número de profesionales expertos en aguas subterráneas en las plantillas de la Administración Hidráulica y de la del Medio Ambiente, si se desea hacer frente con eficacia y sentido económico a los problemas mencionados. Tampoco voy a hablar de los modos de formar a esos profesionales. Ambos temas han sido tratados ampliamente en distintas ocasiones por varios autores y también por Llamas y Custodio (1988). Me ha parecido más apropiado el carácter de esta disertación referirme ahora a la necesidad de impulsar decididamente la investigación en ciertos temas relacionados con las aguas subterráneas, pero que no necesariamente deberán clasificarse como trabajos de investigación y desarrollo (I + D).

Algunos aspectos de la investigación hidrogeológica de I + D han sido ampliamente desarrollados en España durante las dos últimas décadas.

Esta labor ha sido realizada principalmente por el Instituto Geológico y Mínero de España y por el Servicio Geológico de Obras Públicas (SGOP) y la Comisaría de Aguas del Pirineo Oriental de la DGOH; en menor escala han contribuido algunos Departamentos Universitarios especialmente mediante la realización de tesis y tesinas de Hidrogeología o Hidrogeoquímica regional. Como ejemplos característicos de estos estudios de I + D, cabe mencionar, entre otros, los estudios de Recursos Hidráulicos Totales realizados desde hace veinte años por el SGOP y los informes y mapas hidrogeológicos realizados por el IGME dentro del Plan de Investigación de Aguas Subterráneas (PIAS) y del Programa de Gestión y conservación de Acuíferos (PGCA) (Llamas y Custodio, 1988). Esos trabajos deberían ser continuados e incrementados; en el futuro probablemente, serán realizados tanto por el IGME como por la DGOH, pero especialmente por las propias Confederaciones Hidrográficas. Sin embargo, dada la insuficiente —a veces nula— plantilla de hidrogeólogos que tienen esos organismos públicos, la mayor parte de esos trabajos tendrán que ser encargados a oficinas de consultoría. En realidad, esos trabajos de I + D pueden clasificarse como “routine work” en la terminología anglosajona; en otras palabras, se trata de aplicar a situaciones concretas métodos y procedimientos ya bien conocidos y experimentados.

El esfuerzo considerable que se ha realizado en los últimos años ha servido, por una parte, para tener un conocimiento bastante aceptable de la infraestructura hidrogeológica del país y, por otra, para crear en algunos Departamentos universitarios grupos de investigación cuya experiencia y calidad parecen indicar que en los próximos años los hidrogeólogos españoles podrían contribuir al desarrollo de la ciencia internacional con aportaciones originales en métodos e ideas y no sólo aplicando a nuestros problemas los métodos que otros descubrieron o pusieron a punto tiempo atrás en sus países. En otras palabras, parece que estamos en el momento adecuado para que nuestra ciencia hidrogeológica comience a dejar de ser un simple feudo de otros países y entre como un socio de calidad en la comunidad científica hidrogeológica internacional.

Quizá alguno se pregunte dónde están esos grupos investigadores y qué es lo que pueden hacer. Voy a intentar responder a esas preguntas.

En primer lugar, puede ser bueno recordar que el primer puesto estable para enseñar Hidrogeología en la Universidad española fue una Agregaduría de Hidrogeología dotada en 1970 y provista en 1971. Pues bien, en 1988 hay en la Universidad española, al menos, ocho catedráticos y quince profesores titulares cuya dedicación principal es la docencia e

investigación en la ciencia del agua subterránea. De acuerdo con la nueva terminología de la Ley de Reforma Universitaria, las áreas de conocimiento de estos docentes universitarios se reparten principalmente entre Geodinámica, Ingeniería del Terreno e Ingeniería Hidráulica. Estos grupos están *principalmente* en las Universidades Politécnicas de Cataluña, Madrid y Valencia y en las Universidades Complutense, Autónomas de Madrid y Barcelona, Granada y Zaragoza. Hay, además, diez o quince jóvenes doctores hidrogeólogos que probablemente pronto se incorporarán a la Universidad de modo estable. Como contraste cabe decir que en todo el CSIC sólo parece existir una persona de plantilla dedicada al tema de las aguas subterráneas.

A continuación voy a enumerar algunas líneas de investigación hidrogeológica aplicada al mejor conocimiento y gestión del agua subterránea como recurso que me parece se podría y debería potenciar en España en los próximos años. Estas líneas no corresponden exactamente a los problemas previamente mencionados, pero proporcionan los elementos fundamentales para su solución.

Ahora bien, todo lo que sigue tendrá poco valor si el tema de los Recursos Hidráulicos no se incluye pronto entre los programas del Plan Nacional de Investigación Científica (1988-1991), subsanando así la preocupante omisión observada en el primer Plan Nacional de Investigación preparado por el Gobierno, en cumplimiento de la nueva Ley de Ciencia (cf. Martínez, 1987).

a) *Estudios regionales*

Esta línea de investigación comprende una amplia gama de estudios de distintos tipos y finalidades. Por ejemplo, desde la década pasada el U.S. Geological Survey ha promovido un programa de estudios regionales denominado R.A.S.A. (Regional Aquifer Systems Analysis), cuyo objetivo es definir la hidrogeología general y establecer un marco de trabajo —geológico, hidrológico, geoquímico— para las investigaciones detalladas posteriores (cf. U.S. Geological Survey, 1985).

Una metodología similar para los *estudios regionales de recursos hidráulicos totales* fue básicamente bien establecida en España desde hace ya veinte años (Llamas, 1968) y ha dado excelentes resultados. La nueva Ley de Aguas pretende, hasta un extremo casi utópico (Llamas, 1984b y 1987b), convertir los planes hidrológicos en el pilar fundamental de la política hidráulica española y ello va a exigir, sin duda alguna, realizar

más y mejores estudios regionales de recursos hidráulicos totales. Esta metodología puede, además, tener una gran aplicación en muchos países en vías de desarrollo.

Más recientemente se ha prestado mayor interés al análisis de la Hidrogeología regional en las formaciones rocosas de baja permeabilidad (Llamas, 1985). El impulso principal para este tipo de estudios se originó con motivo de los estudios en rocas de baja permeabilidad para los cementerios de residuos radiactivos de alta actividad. Hoy se ha visto que sus implicaciones científicas y prácticas tienen un alcance mucho mayor que el inicialmente supuesto, como más adelante se verá. Parece obvio que el análisis previo de los futuros emplazamientos de los depósitos de residuos nucleares de alta y media actividad exigirá realizar pronto este tipo de estudios en España. Hasta ahora, parece que en España sólo se han realizado estudios hidrogeológicos regionales en formaciones de baja permeabilidad en los sistemas volcánicos de Canarias (Custodio, 1985) y en la cuenca terciaria de Madrid (Llamas, 1985); ambas zonas se han estudiado con vistas al aprovechamiento de sus recursos hidráulicos subterráneos y no como posible emplazamiento de residuos tóxicos o radiactivos.

b) *Geoestadística aplicada a la hidrogeología*

En la última década, los métodos geoestadísticos han entrado con pie firme en la Hidrogeología como un medio para tener en cuenta la influencia de la variabilidad espacial de los parámetros hidrogeológicos que intervienen en las ecuaciones clásicas del flujo en los medios porosos y/o fisurados (de Marsily, 1986, cap. 11). En resumen, se suele admitir que las leyes del flujo en medios porosos y/o fisurados son deterministas. Sin embargo, las incertidumbres inherentes al desconocimiento de la variación espacial de los parámetros hidrogeológicos están conduciendo a la elaboración de una hidrogeología estocástica o probabilística. Hay ya algunos jóvenes científicos españoles que han realizado interesantes y originales contribuciones en este campo (Carrera y Neuman, 1986; Samper, 1986). Parece que convendría facilitar la continuidad de esos trabajos.

c) *Transporte de solutos y energía térmica en las aguas subterráneas*

Las ecuaciones analíticas usualmente empleadas en el estudio del transporte de solutos se establecieron ya en la década de los sesenta en los

EE.UU. En la década de los setenta, la facilidad en el uso de los ordenadores electrónicos permitió la aplicación de las correspondientes soluciones numéricas a casos reales. Inicialmente a problemas de intrusión marina, después a problemas de contaminación tóxica o radiactiva; prácticamente en todos estos casos se suponían líquidos miscibles.

Las discrepancias obtenidas entre los resultados calculados y los datos procedentes de la observación llevaron a la conclusión de que existen todavía considerables incertidumbres sobre la descripción del fenómeno de la dispersión hidrodinámica y de modo particular sobre las reacciones químicas entre el agua y la matriz del acuífero. La investigación en este campo continúa activa, pero está lejos de haber alcanzado (cf. Matthess, 1987).

Las ecuaciones del transporte de calor en medios geológicos son desde el punto de vista matemático muy similares a las del transporte de solutos en líquidos miscibles.

En la década presente se ha visto que, en algunos casos de contaminación, el problema es sensiblemente más complejo por la intervención de líquidos no acuosos, que no son miscibles con el agua; en unos casos, como la gasolina, son menos densos que el agua; en otros, como los compuestos organoclorados, son más densos. Buena parte de la teoría de transporte de fases inmiscibles fue desarrollada en la Geología del Petróleo. Sin embargo, debido a las diferencias de escala, profundidad y precisión requerida en los problemas de contaminación, falta todavía mucho trabajo para adaptar o ampliar a la Hidrogeología los conocimientos procedentes de la tecnología del petróleo. Probablemente las contribuciones científicas originales españolas en este campo serán limitadas, al menos inicialmente, dada la todavía relativamente reducida sensibilidad de la sociedad española por los temas medioambientales y la consiguiente falta de apoyo económico para estas investigaciones.

d) *Zona no saturada*

Entre la superficie topográfica y la zona freática o saturada de las formaciones acuíferas se encuentra una franja de espesor variable que hasta hace pocos años, a nivel mundial, era considerada "tierra de nadie". La zona saturada era objeto de estudio de los hidrogeólogos y la zona edáfica (sólo unos cuantos decímetros de profundidad desde la superficie del terreno) era, y es, objeto de activo estudio por edafólogos y agrónomos.

mos. Sin embargo, hoy se considera imprescindible un mejor conocimiento de los procesos de flujo, bioquímicos y geoquímicos, etc., que tienen lugar en esa zona. Esos procesos determinan fenómenos tan importantes como la cantidad y calidad química de la recarga natural de los acuíferos, la migración de los contaminantes de las aguas subterráneas, etc. Parece que la investigación que se realiza en esta línea en España es sólo incipiente. Por ello, sería bueno facilitar la consolidación de algunos equipos de investigación en este campo.

e) *Hidrogeoquímica*

Como ya se ha visto, la Hidrogeología química ha experimentado un gran desarrollo en otros países en las últimas dos o tres décadas, pasando, de ser casi un simple elemento caracterizador de las aguas subterráneas para los diversos usos, a convertirse en una herramienta casi imprescindible para conocer o comprobar el funcionamiento hidrológico de los sistemas acuíferos. Por lo general, en este tema los análisis isotópicos y su interpretación juegan un papel muchas veces definitivo. Desde hace años, existen en España laboratorios que realizan los análisis de los isótopos ligeros y dos o tres núcleos de investigadores que conocen y aplican las técnicas más modernas. Sin embargo, en mi opinión, sería conveniente reforzar sensiblemente esta línea en los años próximos. La resolución de los múltiples problemas de contaminación que ya existen va a exigir, sin duda, contar con un número de expertos y de laboratorios especializados en este campo muy superior al actualmente existente.

f) *Otros temas*

En la relación anterior de líneas de investigación no he incluido algunos temas, sin duda de gran interés económico, que por su carácter más aplicado o tecnológico parecen menos adecuados para ser comentados en esta Real Academia de Ciencias. Tales son, por ejemplo, los referentes al uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas o a la economía del agua subterránea o al crucial papel de las comunidades de usuarios de aguas en la gestión de los acuíferos sobreexplotados. Por otra parte, dada su más inmediata aplicación, es más fácil que esas investigaciones obtengan el necesario apoyo por parte de la Administración o de fundaciones privadas, que cuando se trata de estudios con un carácter más fundamental.

Tampoco he mencionado una nueva línea de investigación interdisciplinar —la de la Microbiología del agua subterránea— que parece que va a tener un importante desarrollo en los próximos años en aquellos países en los que se está dedicando un notable esfuerzo a combatir la contaminación de las aguas subterráneas y de los suelos por los compuestos tóxicos orgánicos, tales son, por ejemplo, los EE.UU. y Canadá. Una buena panorámica del estado del arte puede verse en el resumen de Moltz (1987) sobre la reunión científica interdisciplinar que sobre este tema organizó la American Geophysical Union en octubre de 1986; allí se llegó a la conclusión general de que los procesos microbianos y las tecnologías relativas a tratamientos bioquímicos *in situ* jugarán un importante papel en nuestra futura comprensión y mitigación de los problemas de contaminación de aguas subterráneas.

EL AGUA SUBTERRANEA EN LOS PROCESOS GEOLOGICOS

Ya se ha indicado el importante papel que está desempeñando la Hidrogeología en orden a conseguir un mejor aprovechamiento y protección de los recursos hidráulicos subterráneos. Se ha tratado también de las áreas en las que se requiere aplicar más esfuerzo investigador con el fin de resolver los diversos problemas planteados en España. Pero, como previamente se dijo, sería un planteamiento alicorto pensar que el presente —y sobre todo el futuro— de la Hidrogeología se reduce a ser una ciencia aplicada cuyo principal objetivo consistiera en permitir el mejor aprovechamiento y protección del agua subterránea, por importante que ésta sea como recurso económico y ecológico. Este papel de la Hidrogeología es hoy y posiblemente continuará siendo durante algunas décadas, el trabajo de la mayoría de los hidrogeólogos que trabajen en la Administración o se dediquen al ejercicio libre de la profesión, e incluso de gran parte de los que se dediquen a la investigación científica.

En efecto, en los últimos años, algunos científicos han desarrollado una serie de trabajos que están poniendo progresivamente de manifiesto, *de modo cuantitativo*, el papel de los fluidos contenidos en los poros y fisuras de las rocas en una amplia gama de procesos geológicos fundamentales. En esta última parte de mi disertación voy a intentar presentar de modo sucinto los aspectos que me parecen más significativos en esa serie de trabajos. Quizá no resulte ocioso decir que no pretendo realizar un análisis crítico profundo de estas nuevas líneas de investigación. Hay múltiples razones para ello, pero quizá sea suficiente mencionar sólo dos. En primer lugar, el carácter pluridisciplinar de muchos de ellos hace que desborden mi limitado campo de experiencia científica. En segundo término, se verá en seguida que de buena parte de los trabajos que menciono sólo existen publicados los “abstracts” de las comunicaciones presentadas en reuniones científicas internacionales recientes.

Aspectos Generales

Desde hace muchas décadas, es bien sabido que los geólogos consideraban que los fluidos intersticiales de las formaciones rocosas juegan un papel importante —a veces primordial— en determinados procesos; basta, por ejemplo, recordar las teorías sobre la génesis de los yacimientos hidrotermales. Como dato curioso, cabe mencionar que, en la pasada década un catedrático español, Martín Alvarez (1974) propuso que se adoptase el término de Geofluidología para aquella parte de la Geología que se ocupara principalmente del papel geológico de los fluidos en la corteza terrestre. Algo más tarde, pero también en la última década, los profesores canadienses Freeze y Cherry (1979), en su conocido y difundido libro de texto “Groundwater” dedicaron el último capítulo al tema “Groundwater and Geologic Processes”. En ese capítulo se sintetiza un cierto número de trabajos previos en los que ya se hacía ver el relevante papel de los fluidos subterráneos en una amplia gama de procesos: desde la explicación de los grandes mantos de corrimiento a la génesis y control de ciertos terremotos; desde la formación de las cuevas kársticas a la evolución de las laderas.

La novedad del enfoque de los trabajos más recientes radica en el tratamiento progresivamente más físico-químico y cuantitativo de estos fenómenos. Esto se consigue, en primer lugar, mediante el planteamiento y la resolución de las ecuaciones físicas y/o químicas que hipotéticamente gobiernan estos procesos; en segundo término, mediante el contraste de los resultados teóricos con los datos observados en la naturaleza.

Se suele admitir que los fluidos subterráneos se mueven principalmente a causa de la acción de la gravedad o de las presiones osmóticas. Este segundo tipo de causa se conoce mucho peor. La acción de la gravedad está relacionada con la densidad del agua que, a su vez, depende de la temperatura y de su contenido salino. Por otra parte, los cambios en la presión de los fluidos se traducen en cambios tensionales en la roca que los alberga, como consecuencia de ellos suelen producirse fenómenos de compactación que provocan la expulsión o movimiento de fluidos. El fenómeno de la compactación en los sedimentos finos suele ser muy lento, a veces tiene una duración de millones de años. Una vez terminada la compactación, se considera que esa cuenca sedimentaria está madura. En buena parte de los estudios cuantitativos realizados se solía considerar cuencas maduras, es decir, su porosidad permanece constante a lo largo del tiempo; en ese caso, la fuerza que gobierna el flujo es debida al campo gravitatorio; los cambios de temperatura se suelen tener en cuenta sola-

mente por su influencia en la densidad y viscosidad del fluido que, a su vez, hacen variar la permeabilidad; los fenómenos osmóticos o de geomembranas rara vez son considerados de modo cuantitativo, dadas las incertidumbres que todavía existen sobre estos procesos.

A lo largo de su recorrido, la composición química del agua puede experimentar cambios muy notables; cuando el aumento de salinidad es importante, el cambio en la densidad del fluido debe ser también tenido en cuenta en las ecuaciones del flujo bajo la acción de las fuerzas gravitatorias, tal como se hace por ejemplo en el modelo numérico de transferencia de solutos de Sanford and Konikow (1985).

Una hipótesis central y común a casi todas estas investigaciones consiste en admitir que, en la zona superior de la corteza terrestre, la permeabilidad, la porosidad y la compresibilidad de una formación geológica pueden influir de modo significativo en la evolución de los diversos procesos mecánicos (flujo y compactación), térmicos y químicos. A su vez, estos procesos pueden modificar el valor de esos parámetros de la formación geológica a lo largo del espacio y del tiempo.

Los científicos que trabajan con este nuevo enfoque cuantitativo proceden de diversas áreas científicas: Geomorfología, Geotectónica, Geofísica, Sismología, Geoquímica, Yacimientos minerales, Geología del Petróleo, etc. En los últimos años, el principal impulso investigador parece provenir de personas procedentes del área de la Hidrogeología. Quizá esto se pueda atribuir a que desde hace, al menos, un par de décadas, la necesidad de gestionar o proteger los recursos hídricos subterráneos contra su contaminación exige a los hidregeólogos respuestas cada vez más concretas y cuantitativas. Estas respuestas están resultando posibles gracias a los nuevos instrumentos de cálculo electrónico que permiten resolver adecuadamente las ecuaciones diferenciales del flujo subterráneo mediante distintas técnicas de cálculo numérico. Cuando se trata de problemas de contaminación química o térmica de aguas subterráneas, el planteamiento teórico y la resolución práctica de las ecuaciones de transporte de masa y/o calor todavía plantea algunos problemas. Ahora bien, los problemas de la gestión de los recursos hidráulicos suelen tener un horizonte temporal corto, pues rara vez se hacen previsiones a más de cincuenta años. Por otra parte, generalmente, las formaciones geológicas objeto de esos estudios están a profundidades que no suelen superar unos pocos centenares de metros.

El tránsito de modelos numéricos, propios de la ingeniería de recursos hidráulicos, a modelos que tienen un mayor alcance temporal y espacial

(en profundidad), y por tanto exigen considerar procesos geológicos, ha obedecido a distintas causas; entre ellas, no es de despreciar el hecho de que un buen número de los expertos en aguas subterráneas dedicadas a la gestión de recursos hidráulicos son geólogos y/o trabajan en Departamentos universitarios de Geología.

Otro factor que está contribuyendo definitivamente al desarrollo de este tipo de investigación es el hecho de que, en los últimos años, la preocupación racional o emocional por los temas del medio ambiente —y en especial por los depósitos o cementerios de residuos radiactivos de alta actividad— está requiriendo la realización de un tipo de estudios nunca exigido anteriormente. En efecto, esos estudios requieren hacer predicciones sobre lo que le puede ocurrir a dichos depósitos durante decenas de miles de años después de su instalación. Esto está conduciendo a la realización de estudios geológicos e hidrogeológicos que hace pocos años eran inimaginables. Por ejemplo, el programa CASTOR (Construction Automatique de Scénarios d'évolution d'une site de STockage de déchets Radioactives) en proceso de desarrollo por un equipo pluridisciplinar francés (Canceil et al., 1985) trata de predecir a lo largo de unos cien mil años cuál puede ser la evolución del flujo subterráneo en las inmediaciones de un hipotético emplazamiento de residuos radiactivos de alta actividad (conviene no olvidar que Francia ocupa un tercer lugar mundial en la producción de energía termonuclear). Durante ese largo período se simulan diversos fenómenos geológicos; entre ellos: un período glacial con los consiguientes efectos de descenso eustático, erosión glacial y fluvial; y el reajuste isostático por el peso de la capa de hielo suprayacente. El programa CASTOR considera cómo estos fenómenos afectan a los parámetros hidrogeológicos y al tiempo de emigración del agua subterránea desde el hipotético cementerio nuclear hasta la biosfera.

Ahora bien, como ya antes se dijo, el ámbito de interés de este nuevo enfoque no se circunscribe al intenso pero limitado —y posiblemente efímero— ámbito de la gestión de los residuos radiactivos. Como confirmación de ello, basta leer los resúmenes de algunas comunicaciones presentadas en las tres reuniones científicas que menciono a continuación, que tuvieron lugar el año 1986. La primera es la reunión de primavera de la American Geophysical Union (Baltimore 19-22 mayo 1986) en la que un programa principal de la Sección de Hidrología tenía como título "Role of Groundwater Flow in Geologic and Geodynamic Processes". La segunda es el "Third Canadian-American Symposium on Hydrogeology of large Sedimentary Basins" (Banff, 23-26 junio 1986). La tercera y última es la reunión anual de la Geological Society of America (San Antonio,

10-13 noviembre 1986), dentro de la que tuvo lugar un Simposio sobre Hidrogeología de Cuencas Sedimentarias. A estar tres reuniones cabe añadir el "Symposium on Hydrogeological Regimes and their Subsurface Thermal Effects" que se ha celebrado en agosto de 1987 en Vancouver (Canadá), durante la Asamblea General de la internacional Union of Geology and Geophysics. Dicho Simposio, con un carácter netamente interdisciplinar, está patrocinado por varias sociedades científicas. Su principal objetivo es una mejor comprensión de los sistemas térmico-fluidos subsuperficiales que parecen jugar un papel importante en las cuencas sedimentarias, en las cordilleras oceánicas y en otros muchos lugares. Un mejor conocimiento de la interacción entre el sistema térmico y el sistema de flujo subterráneo tiene importancia no sólo para el esclarecimiento de la génesis de algunos depósitos minerales de interés económico, sino también para la comprobación de algunas teorías geofísicas que se apoyan en adecuadas medidas del flujo térmico, que a su vez está influido por el movimiento del agua subterránea.

Voy a pasar ahora a mencionar algunos estudios recientes que analizan de *modo cuantitativo* el papel de las aguas subterráneas en distintos procesos geológicos fundamentales. Primero se verán los que se refieren a la Geodinámica externa y, después, los de la Geodinámica interna. En cualquier caso, insisto, no se pretende hacer un análisis completo del tema. Se trata más bien de dar unas pinceladas que permitan encuadrar el interesante papel que tiene ya la Hidrogeología, como un área de investigación científica básica en el dominio de las Ciencias de la Tierra.

El agua subterránea en algunos procesos de la Geodinámica externa

Casi sin excepción, cualquier libro de texto de Geología general o de Geodinámica externa, al hablar de las aguas subterráneas, tratará de modo predominante, a veces casi exclusivo, de los fenómenos del Karst, es decir, de las peculiares y pintorescas formas de relieve que se originan en ciertos tipos de formaciones geológicas, especialmente en rocas carbonatadas, que, con relativa velocidad, son disueltas o atacadas químicamente por las aguas subterráneas de origen meteórico. El fenómeno es, pues, conocido desde antiguo. Ahora bien, su tratamiento cuantitativo es más reciente, tanto en lo que respecta al flujo como a los procesos geoquímicos conexos. Todavía existe cierta diversidad de pareceres sobre el valor de los modelos matemáticos digitales basados en la ley de Darcy para representar adecuadamente el flujo en los sistemas kársticos. Consi-

deran algunos que la heterogeneidad de estos sistemas es tal que su tratamiento sólo es abarcable mediante técnicas estadísticas de "black box" más o menos complejas. Mi parecer personal, sin negar el interés general de ciertos métodos estadísticos, es que, cuando se trata de estudios de gestión de recursos, los acuíferos kársticos pueden y deben tratarse con modelos matemáticos basados en las leyes usuales de la hidráulica y, en general, en la hipótesis de linealidad entre el gradiente hidráulico y la velocidad (ecuación de Darcy). El tipo y el detalle de estos modelos dependerá de la finalidad del estudio. Así, por ejemplo, en España modelos sencillos de flujo subterráneo en diferencias finitas fueron ya utilizados hace ya más de diez años para el análisis de los acuíferos kársticos del Llano de Palma (Aragonés et al., 1973) y Torrelaguna (Llamas y López Camacho, 1975). En otros casos, especialmente en los problemas de contaminación, se hace necesario utilizar modelos más perfeccionados: en elementos finitos, con doble porosidad, etc. (Cullen and La Fleur, 1984; Palmer, 1984) o los más recientes modelos de medios fracturados que hoy son objeto de activa investigación (Marsily, 1986).

En lo que se refiere a las reacciones roca-agua en el karst, también en los últimos años se están produciendo notables avances, gracias, en no pequeña parte, a los programas de cálculo que permiten resolver de modo rápido tanto la especiación química de una muestra de agua subterránea como las ecuaciones químicas de balance de masa o de transporte de masa. Ello ha permitido, por ejemplo, conocer mejor las reacciones roca-agua que tienen lugar en los acuíferos calcáreos costeros (Back et al., 1984; Back, 1986). Parece probable que estas reacciones expliquen gran parte de los procesos de dolomitización de las calizas. Es generalmente admitido que la porosidad y la permeabilidad de un cuifero carbonatado suelen aumentar a medida que avanza el proceso de karstificación. Ahora bien, la cuantificación de ese proceso y su aplicación a casos reales exige el acoplamiento de las ecuaciones de flujo y de las ecuaciones químicas y el establecimiento de algún tipo de ley empírica que relacione la velocidad de disolución/precipitación de los carbonatos con el cambio de permeabilidad/porosidad. La literatura científica sobre este tema parece todavía escasa (Back y Llamas, 1988).

Aunque la acción geomorfológica de las aguas subterráneas es primordial en el karst, también puede jugar un notable papel en otros procesos. Entre ellos cabe mencionar los procesos de erosión subterránea (sufosión o zapado; piping y sapping, en la terminología anglosajona), como ponen de manifiesto Jones (1981) e Higgins (1984). La dinámica de las laderas está fuertemente condicionada por la presencia del agua subte-

rránea; hecho, por otra parte, bien conocido por los especialistas en Mecánica de Suelos y Rocas (cfr. Freeze and Cherry, 1979; Domenico, 1972; Jiménez Salas, 1982; Jiménez Salas et al., 1981).

No insisto más en los procesos de la Geodinámica externa por considerar que son los más conocidos.

El agua subterránea en algunos procesos de la Geodinámica interna

Quizá es en esta área donde en los años recientes se están realizando investigaciones más novedosas. Por ello me detendré aquí más que en los temas precedentes relacionados con la Geodinámica externa. Algunos de estos trabajos son tan recientes que todavía sólo los conozco por las presentaciones verbales y/o los "abstracts" de las tres reuniones científicas del año 1986 antes mencionadas.

Casi parece obligado mencionar en primer lugar los trabajos del profesor canadiense J. Tóth. El es quien, desde los años sesenta y junto con otros geólogos canadienses, ha sido uno de los pioneros en tratar de cuantificar el flujo de las aguas subterráneas en grandes cuencas sedimentarias. En un reciente trabajo, Tóth (1984) presenta una síntesis de la evolución química y térmica de las aguas subterráneas en las grandes cuencas sedimentarias, así como de sus posibles efectos en la génesis de yacimientos petrolíferos y minerales y de su manifestación geomorfológica externa; en dicho trabajo se supone que la causa principal del flujo de las aguas subterráneas es la acción de la gravedad. En una comunicación posterior, todavía no publicada *in extenso*, Tóth (1986a) ha resumido también las teorías que conceden importancia a los procesos de compactación u ósmosis para explicar el movimiento o quimismo de las aguas subterráneas en las grandes cuencas sedimentarias.

El concepto de grandes sistemas de flujo subterráneo, aplicado inicialmente de modo principal a las grandes cuencas sedimentarias, se está extendiendo progresivamente a zonas más amplias de la corteza terrestre. Así, Oliver (1986), en la última reunión de la Sociedad Geológica de América y con base en el análisis de un extenso conjunto de perfiles geosísmicos por reflexión, ha sostenido que las zonas altamente reflectantes de situación aproximadamente horizontal y situadas a unos 20 kilómetros de profundidad pueden corresponder a zonas de magma o a rocas

porosas saturadas de fluidos. La existencia de estos fluidos sugiere nuevos modelos tectónicos.

Desde hace tiempo —y gracias a los datos isotópicos— se piensa que las aguas que circulan en los sistemas hidrotermales son fundamentalmente aguas de origen meteórico, de modo que el posible papel en estos sistemas de las aguas primarias o juveniles cada vez parece menos importante. Sin embargo, sólo en los últimos años ha comenzado a existir evidencia de que la entrada o infiltración de aguas meteóricas o marinas en las regiones de “rift” puede alcanzar profundidades muy grandes dentro de la corteza terrestre. Según Taylor (1986), en un cierto número de zonas se ha demostrado que esta penetración alcanza profundidades de 5 a 10 kilómetros y quizá hasta 20 kilómetros. Estas zonas corresponden a ciertas zonas de las cordilleras medio-oceánicas o a sus prolongaciones subáreas, como Islandia o el lago Salton en California; también a “rift-valleys” incipientes, como el Mar Rojo o a amplias zonas de tectónica de extensión como la “Range and Basin Region” del Oeste americano. También, según el mismo autor, una característica común a todas estas zonas es la existencia de magmas con bajo contenido de ^{18}O . Es más, parece que este tipo de magmas es exclusivo de este tipo de zonas en las que se conjugan los factores siguientes: *a)* subsidencia a grandes profundidades de rocas alteradas hidrotermalmente; *b)* abundante llegada de magma, y *c)* continua apertura de nuevas fracturas.

A su vez, el análisis de las relaciones entre la tectónica de placas y los manantiales submarinos hidrotermales descubiertos sólo hace pocos años, también parece constituir una línea de investigación prometedora. Estos manantiales suelen denominarse “black smokers”, por el penacho oscuro que les suele caracterizar. Este color se debe principalmente a la precipitación de sulfuros metálicos por la reacción de las aguas del manantial de carácter netamente reductor y con cierto contenido en ion sulfhídrico con las aguas oceánicas. Por lo general, estos manantiales están localizados en diversas cordilleras medio-oceánicas, es decir, en zonas de crecimiento de la corteza oceánica. Independientemente de su estricto interés geodinámico y para la explicación de la génesis de ciertos yacimientos de sulfuros metálicos masivos, el ambiente reductor y anómalamente caliente de las proximidades de estos manantiales, conjuntamente con las formas de vida que allí se encuentran, está siendo objeto de intenso estudio por los científicos que se ocupan de investigar el origen y evolución de la vida en nuestro planeta, ya que se considera que ese ambiente puede guardar cierta analogía con el que predominaba en la tierra hace más de mil millones de años, cuando todavía no existía una atmósfera con oxígeno,

parecida a la actual (cfr. Haymon and McDonald, 1985; Rona et al., 1986).

Desde el punto de vista mecánico, desde hace años se trabaja en el análisis de la influencia de la presión de los fluidos intersticiales en el estado tensional de las formaciones rocosas y en su fracturación. Medidas del estado tensional de las rocas a profundidades entre 1 y 5 kilómetros indican que la relación entre los valores máximo y mínimo de los ejes del elipsoide de tensiones suelen oscilar de 0,3 a 0,8. Los estudios experimentales de laboratorio sobre las condiciones de rotura en similares estados tensionales indican que un aumento de la presión intersticial, supuesta inicialmente hidrostática, hasta sólo la mitad de la presión litostática conduciría a la rotura de la roca en muchos casos. Asumiendo estas hipótesis y también que la permeabilidad intrínseca de algunas zonas sísmicas es del orden de 10^{-16} a 10^{-18} m² (10^{-4} a 10^{-6} darcys), Rojstaczer (1986) ha utilizado un modelo bidimensional para estimar la velocidad de variación de la compresión y los tiempos necesarios para generar una presión intersticial que sea igual a la mitad de la litoestática. Admitiendo velocidades de comprensión análogas a las observadas en los márgenes de las placas, obtienen tiempos que oscilan entre mil y diez mil años para alcanzar una presión intersticial igual a la mitad de la litostática. En definitiva, estos estudios van conduciendo a un mejor conocimiento de la mecánica de los terremotos y es posible que, en un futuro más o menos próximo, permitan encontrar técnicas para predecir y quizá evitar los terremotos catastróficos (cf. Freeze and Cherry, 1979; Roeloffs and Rudnicki, 1986).

La evolución hidrogeológica de una cuenca sedimentaria suele cambiar a lo largo del tiempo desde un sistema cuyo flujo subterráneo está dominado inicialmente por los procesos de compactación de los sedimentos a causa de la sobrecarga aportada por nuevos sedimentos, a un sistema maduro cuyo flujo subterráneo procede esencialmente de las aguas meteóricas infiltradas que circulan a causa de las diferencias de potencial del campo gravitatorio relacionadas, a su vez, con los cambios de relieve topográfico. Diversos autores han estudiado la evolución paleohidrogeológica de algunas cuencas sedimentarias mediante el estudio de perfiles verticales representativos de la cuenca. En esos análisis se suelen emplear modelos digitales en elementos finitos que tienen en cuenta la compactación de los sedimentos y el flujo por la acción del campo gravitatorio, así como los cambios de relieve debidos a movimientos eustáticos o tectónicos.

Una de las cuencas más estudiadas ha sido la del Golfo de Méjico, lo

cual no es extraño si se tiene en cuenta la cuantiosa información geológica e hidrogeológica allí obtenida con motivo de las explotaciones petrolíferas. Mediante uno de estos modelos, Blanchard y Sharp (1986) llegan a las conclusiones siguientes referentes a la zona NE del Golfo de Méjico: 1) las sobrepresiones y el flujo del fluido están controlados por la permeabilidad que, a su vez, es una función de las facies sedimentarias; 2) ha sido posible la entrada en profundidad de aguas meteóricas en las fases iniciales (Cretácico), pero esto depende mucho de la permeabilidad de las rocas y de la situación del nivel del mar; 3) pueden haber existido sobrepresiones durante el Cretácico y el Eoceno antiguo, pero las sobrepresiones significativas no se desarrollan hasta el Paleógeno tardío; 4) las zonas muy permeables y lateralmente continuas pueden depresurizarse y convertirse en zonas sin movimiento o estancadas hasta que se represuricen de nuevo a causa de un suceso deposicional posterior. Por ello, los últimos episodios deposicionales son muy importantes para la comprensión del sistema hidrogeológico actual.

En este último sentido también parece interesante el trabajo de Senger et al. (1986) sobre la influencia de la tectónica y de la evolución geomorfológica en el actual sistema de presiones en la cuenca sedimentaria del Palo Duro (Tejas). En este caso, la cuenca fue también estudiada mediante un perfil vertical de flujo con condiciones en los límites variables a lo largo del tiempo y con un término-fuente para simular la descarga por erosión. En esta cuenca, las formaciones geológicas acuíferas situadas entre 1.000 y 3.000 metros de profundidad tienen una presión inferior a la normal, en comparación con la del conocido acuífero superficial de Ogallala, del que están separadas por una potente capa de evaporitas de hasta 1.500 metros de espesor. El período modelado alcanza unos diez millones de años. Los resultados del modelo parecen dar una explicación plausible de las bajas presiones observadas.

Otro grupo de investigadores (Bethke, 1986; Bethke and Harrison, 1986; Harrison and Bethke, 1986) también han estudiado la cuenca sedimentaria del Golfo de Méjico en su conjunto y teniendo en cuenta a la vez la compactación, el flujo puramente gravitatorio, los esfuerzos tectónicos y los cambios en el relieve topográfico durante la evolución de la cuenca sedimentaria a lo largo de los últimos cien millones de años. Los resultados preliminares de estos modelos parecen indicar que el agua meteórica juega, en general, un papel importante y es introducida en la cuenca sedimentaria principalmente a causa de los cambios en el relieve topográfico subaéreo. Los cambios en las presiones intersticiales en relación con el valor hidrostático obedecen a períodos de compactación o de

reajuste. Neuzil (1986) ha llamado la atención sobre la importancia que tiene la utilización de correctos coeficientes de compresibilidad y de expansividad en este tipo de modelos.

En general, estos análisis paleo-hidrogeológicos, por ahora, sólo deben considerarse como primeras aproximaciones a la realidad, dadas las simplificaciones del medio físico que implican. Domenico y Palciuskas (1986) han llamado la atención sobre el papel de las propiedades de los materiales cuando se trata de estimar la generación y disipación de presiones en los fluidos de las cuencas sedimentarias activas. Sostienen estos autores que el modelo más completo debe ser completamente compresible, es decir, los poros, los fluidos y la matriz sólida deben ser tratados como compresibles.

Como se ve, el análisis detallado de la hidrogeología de las grandes cuencas sedimentarias es complejo y queda todavía mucho camino por recorrer. Por ejemplo, en algunos casos se ha planteado la posibilidad de que las diferencias de densidad entre las aguas subterráneas profundas y superficiales pudieran dar lugar a flujos convectivos a gran escala, que provocaran el "vuelco" de esas aguas. Se entiende que este "vuelco" se produce en el caso de que las aguas subterráneas más profundas tengan menor densidad que las aguas subterráneas situadas por encima. Hanor (1986) da noticia de un caso en la cuenca sedimentaria del Golfo de Méjico en Louisiana, en la que los datos químicos e isotópicos parecen confirmar esta situación. En conjunto, la causa dominante del flujo subterráneo en la parte profunda de la zona estudiada es el gradiente de presión. Sin embargo, en los tres kilómetros superiores del sistema parece que el factor principal que controla el movimiento son las diferencias de densidad del agua subterránea ocasionadas por la disolución de sal de varios domos salinos. Esta disolución tiene lugar preferentemente a profundidades inferiores a dos kilómetros y llega a hacer que las aguas superiores tengan una densidad de 1,07 y las inferiores de sólo 0,98 g/cm³. Como consecuencia de ello, se crea un estado de inestabilidad gravitatoria que da origen a unos penachos de salinidad en la proximidad de algunos domos salinos.

Hace ya casi treinta años, Hubbert and Rubey (1959) formularon la hipótesis de que el aumento en la presión de los fluidos intersticiales podría jugar un papel relevante en la génesis de los mantos de corrimiento; sin embargo, era menos claro cuál podría ser el proceso que daba origen a ese aumento de las presiones intersticiales. Engelder y Bethke (1986) han vuelto a estudiar el modelo de Hubbert y Rubey y llegan a la

conclusión de que el aumento de las presiones intersticiales en el caso estudiado por ellos también debe atribuirse de modo principal al flujo gravitatorio inducido por los cambios de relieve topográfico, que a su vez obedece principalmente a movimientos pirogénicos o tectónicos.

El papel del agua subterránea continental o submarina en algunas erupciones volcánicas cada vez suele ser más admitido, al menos como catalizador de las erupciones, hasta el punto de que las erupciones consideradas como freatomagmáticas son hoy muy frecuentes. Como exponen Freeze and Cherry (1979), probablemente, el principal impulso para las investigaciones cuantitativas en este tema, ha ido unido a los análisis para el aprovechamiento de la energía geotérmica de alta entalpía. De ahí han derivado otros muchos estudios más básicos o teóricos, como son, por citar sólo dos ejemplos, el de Norton and Knight (1977), que analiza la variación teórica de temperaturas y los flujos convectivos originados por la intrusión de un plutón, o un trabajo más reciente de Sorey (1986), que ha estudiado mediante un modelo matemático el calentamiento y el quimismo de los geysers del Yellowstone Park, en California.

La emisión casi explosiva de gas letal que tuvo lugar el 21 de agosto de 1986 en el lago Nyos del Camerún, causó la muerte de 1.746 personas. Esta catastrófica y peculiar erupción de gas procedente de un lago situado en un cráter volcánico ha sido atribuida (cf. Sigurdsson, 1987) a una acumulación de CO₂, originado por la degasificación del manto, en las aguas del fondo de este lago. Aunque todavía no han sido definitivamente aclaradas las causas de ese fenómeno natural tan poco frecuente, no se excluye que la hidrogeología de la zona haya podido jugar un papel importante, tanto en la acumulación del gas en el fondo del lago como en su súbito escape o exsolución.

Para terminar esta breve e incompleta exposición de estudios cuantitativos, o al menos semi-cuantitativos, que ponen de relieve el papel de las aguas subterráneas en ciertos procesos geológicos, voy a mencionar otras dos líneas de investigación aplicada relacionados con la Hidrogeología de las grandes cuencas sedimentarias, que parecen prometedoras. La primera es la relativa al papel del agua subterránea en la génesis de ciertos yacimientos minerales. Como ejemplo representativo, pero obviamente no único, de esta línea, cabe mencionar los trabajos de Garven and Freeze (1984) y de Garven (1985), quienes han mostrado que la génesis de los yacimientos estratoligados de sulfuros de Pine Point, en Canadá, puede ser explicada mediante el empleo conjunto de un modelo de flujo de aguas subterráneas relativamente sencillo y de un modelo hidroquímico

mas o menos convencional; es decir, sin necesidad de recurrir a conceptos más o menos etéreos y difíciles de expresar mediante las leyes clásicas de la Física y de la Química. La segunda línea de investigación está relacionada con el nacimiento de una nueva Hidrogeología, la Hidrogeología del Petróleo, en el caso de que se confirmen las hipótesis propugnadas recientemente por Tóth (1986 b). Este autor propone dos nuevos métodos de exploración de petróleo basado en el análisis hidrogeológico de la correspondiente cuenca sedimentaria. El primero se titula: “análisis de las pautas de migración”; el segundo, “análisis de las pautas de indicadores”. Se ha pasado, pues, de unas investigaciones básicas a unos métodos prácticos para localizar uno de los recursos económicos más importantes: el petróleo. Vemos, una vez más, que las fronteras entre la Ciencia Básica y la Ciencia Aplicada están tan difuminadas que en la práctica es casi imposible distinguir las.

CONSIDERACIONES FINALES

A lo largo de este tiempo, he intentado facilitarles una visión general del pasado, del presente y del posible futuro de la ciencia y de la tecnología de las aguas subterráneas. Hemos visto que es mucho lo que a lo largo de las últimas décadas se ha conseguido en el mundo y en España dentro de este dominio del saber científico. Ahora bien, las tareas pendientes —e incluso urgentes— son todavía de mayor entidad.

Me voy a permitir ahora cerrar esta conferencia con unas consideraciones básicas cuyo alcance no se limita a la investigación hidrogeológica. La primera se refiere a la *libertad de investigación*, que es condición indispensable para la fecundidad científica. Sobre ella siempre se ciernen amenazas más o menos remotas que pueden tener distintos orígenes.

No hace mucho publiqué un trabajo en el que criticaba la actitud dogmática y antialogante de algunas personas que parecían sentirse investidas del “don de la infabilidad hidráulica”. No deseo, ni remotamente, dar la sensación de que yo también me siento en posesión de ese don. Por ello, he procurado exponer los *hechos* del modo más objetivo y fidedigno posible, de manera que constituyan un punto de apoyo fiable para los que trabajen en este tema. Mis interpretaciones de esos hechos bien podrían haber comenzado de modo análogo a como Isaac Newton enunció su Ley de la Gravedad: “It seems as...”; o como Tomás de Aquino iniciaba sus proposiciones filosóficas y teológicas: “Videtur quod...”; es decir: parece que...

Me gustaría que uno de los resultados principales de esta conferencia fuera el de catalizar una ulterior discusión serena —en el sentido británico de la palabra “discussion”— sobre tantos temas de la ciencia hidrogeológica en los que aún existen significativas incógnitas pendientes de despejar. La resolución de esas incertidumbres no sólo aportará elementos claves para el mejor conocimiento de los procesos geodinámicos funda-

mentales, sino que en muchos casos tendrá aplicaciones inmediatas y directas a la solución de graves problemas ambientales, sanitarios, económicos y políticos; y eso, tanto en España como en otros muchos países. Para conseguir este objetivo, es fundamental que un grupo selecto de jóvenes científicos vea tanto el apasionante desafío intelectual como la trascendencia social que suponen las nuevas fronteras de la Hidrogeología. También será necesario que vean la *responsabilidad* que pueden tener sus actuaciones, de modo que ni difundan sus conocimientos y datos con imprudencia, ni tampoco callen, cuando deban hablar, por sentirse amordazados mediante la trampa de ciertos contratos de investigación. Desgraciadamente, en todo el mundo, los que tienen el poder económico y/o político suelen pensar que en el terreno científico también tiene validez el viejo refrán: "quien paga la música dice lo que hay que tocar". En mi opinión, pocas cosas podrían ser más perniciosas para la libertad de la investigación en España que una proliferación de esos sesgados contratos. Como decía Juan Pablo II (1983): "Sólo por el culto desinteresado de la verdad es como la cultura y, en particular, la ciencia conservan su libertad y pueden defenderla contra toda tentativa de manipulación procedente de las ideologías y del poder".

Mi segunda y última consideración tiene también un carácter fundamental y ético. En septiembre de 1985, tuvo la Asociación Internacional de Hidrogeólogos su XVIII Congreso Internacional en la sede del Churchill College de la Universidad de Cambridge en Inglaterra. En la entrada de dicho "college", el más moderno de esa conocida Universidad, hay una placa de bronce que dice "Felix qui potest causas rerum agnoscere". Es verdad. El conocimiento de las causas de las cosas, que es el objetivo de la tarea científica, produce un indudable gozo intelectual, que es una lógica consecuencia de que el hombre está hecho a semejanza de Dios; el conocimiento humano es un modo de participar en la ciencia y poder del Creador. Ahora bien, es bien conocido que esta facultad cuasi-divina puede emplearse tanto para el bien como para el mal de la humanidad; bien sea de modo directo, bien rompiendo la armonía de la naturaleza mediante las múltiples formas de auténticos delitos ecológicos.

Esta dicotomía de posibilidades es clara en la Hidrogeología. Así, por ejemplo, entre los aspectos positivos cabe mencionar que los hidrogeólogos podemos contribuir ya ahora significativamente a paliar problemas tan serios como los de las auténticas calamidades causadas por las sequías en numerosas zonas de nuestro planeta. Hemos visto también que, en un futuro próximo, es probable que el avance de la Hidrogeología contribuirá a conocer muchos procesos básicos de la Geología que servirán para

controlar, o al menos predecir con mayor exactitud, algunos riesgos geológicos catastróficos, como cierto tipo de erupciones volcánicas, algunos terremotos y los grandes deslizamientos de laderas.

Entre los aspectos negativos, cabe decir que el mejor conocimiento de las aguas subterráneas puede facilitar una concentración de poder en las manos de gobiernos que, con la excusa de una mejor administración de este vital recurso, establezcan auténticos “hydraulic big brothers” de tipo orwelliano con el objetivo no confesado de utilizar la administración de este recurso como un instrumento de presión política o económica para restringir la libertad de los ciudadanos.

Me parece que a los hombres de ciencia, en general —y a los que nos ocupamos de los recursos naturales, en particular—, nos corresponde utilizar nuestros conocimientos y/o descubrimientos para facilitar el progreso general, material y espiritual, de la humanidad y no para facilitar el establecimiento de nuevos tipos de opresión o esclavitud. Para ello, es imprescindible que los científicos seamos capaces de suministrar a los gobernantes y a toda la sociedad, nuestras informaciones y datos de un modo objetivo, desapasionado y fácilmente comprensible. De algún modo, eso es lo que he intentado hacer durante el tiempo que Vds. han tenido la amabilidad de escucharme.

Muchas gracias por su atención.

BIBLIOGRAFIA

- ALIA, M. (1971): "Geología básica y aplicada: Los Fosfatos del Sahara Español", *Las Ciencias*, vol. 36, núm. 1, págs. 1-18.
- ANDERSON, M. P. (1983): "Ground-Water modeling — The Emperor has no cloths", *Ground Water*, vol. 21, núm. 6, págs. 666-669.
- ANÓNIMO (1987): "Special Superfund report", *Ground Water Monitoring Review*, vol. 7, núm. 3, págs. 43-47.
- ARAGONÉS, J. M.; LÓPEZ, L., y LLAMAS, M. R. (1973): "Modelo para el estudio de la explotación del acuífero de Palma de Mallorca", *Boletín Informativo del Servicio Geológico de Obras Públicas*, núm. 38, 75 págs.
- ARTIGAS, M. (1985): "Ciencia, Razón y Fe", *Libros MC*, Madrid, 187 págs.
- BACK, W. (1986): "Geological Significance of the groundwater mixing zone", *Eos*, vol. 67, núm. 16, pág. 272.
- y FREEZE, R. A. (1983): "Chemical Hydrogeology", Hutchinson Ross Pub. Co., 413 págs.
- HANSHW, B. B., y VAN DRIEL, J. N. (1984): "Role of Groundwater in shaping the eastern coastline of the Yucatán Península, México", en *Groundwater as a Geomorphic Agent*, La Fleur (ed.), Allen and Unwin, Boston, págs. 282-292.
- y LLAMAS, M. R. (1988): "Tendencias en Hidrogeoquímica", *El Geólogo* (en prensa).
- BERNÁLDEZ, F. G.; HERRERA, P.; LEVASSOR, C.; PECO, B., y SASTRE, A. (1987): "Las aguas subterráneas en el paisaje", *Investigación y Ciencia*, núm. 127, págs. 8-17.
- BETHKE, C. M. (1986): "Roles of Sediment Compactation, Tectonic Compression and Topographic Relief in Driving Deep Ground-Water Migration", *Abstracts of the 99th Annual Meeting of the Geol. Soc. Am.*, pág. 540.
- y HARRISON, W. J. (1986): "Dynamics of Geopressed Zones during

- Compaction of the U. S. Gulf Coast Basin”, *Abstracts of the 99th Annual Meeting of the Geol. Soc. Am.*, pág. 540.
- BEVEN, K. (1987): “Towards a new paradigm in Hydrology”, *Proc. of the Intern. Symp. Water for the Future*, IAHS Pub. núm. 164, págs. 393-403.
- BLANCHARD, P., y SHARP, J. M. (1986): “Paleohydrology of the North-western Gulf of Mexico Sedimentary Basin”, *Abstracts of the 99th Annual Meeting of the Geol. Soc. Am.*, pág. 543.
- CANCEILL, M.; BILLAUX, D.; COURBOULEIX, S. —y nueve autores más— (1985): “Natural evolution of a long life radioactive wastes disposal site: modelization trial from a Geoprospective approach”, *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.*, núm. 32, págs. 25-47.
- CARRERA, J., y NEUMAN, S. P. (1986): “Estimation of Aquifer parameters under transient and steady state conditions”, *Water Res. Res.*, vol. 22, núm. 2, págs. 199-242.
- COMA, J. E. (1974): “El Plan Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas”, *Hidrología*, núms. 15/16, Madrid, págs. 85-104.
- CULLEN, J. J., y LAFLEUR, R. G. (1984): “Theoretical considerations on simulation of karstic aquifers”, en *Groundwater as a Geomorphic Agent*, LaFleur (ed.), Allen and Unwing, Boston, 249-279 págs.
- CUSTODIO, E. (1985): “Low Permeability Volcanics in the Canary Islands (Spain)”, *Memoires of the Int. Assoc. of Hydrogeol.*, vol. XVII, núm. 2, págs. 562-573.
- (1987a): “La Ciencia del Agua y su aplicación al problema de las Islas Canarias”, *Tecnología del Agua*, núm. 35, págs. 71-81.
- (1987b): “Peculiaridades de la Hidrología de los complejos palustres españoles”, en *Bases Científicas para la Protección de los Humedales en España*, Real Academia de Ciencias, Madrid, págs. 43-63.
- y LLAMAS, M. R. (1976, 1983): “Hidrología Subterránea”, Omega, Barcelona, 2 vols., 2.347 págs.
- DOMENICO, P. A. (1972): “Concepts and Models in Groundwater Hydrology”, *McGraw-Hill*, 520 págs.
- y PALCIUSKAS, V. V. (1986): “Role of material properties in assesing fluid pressure generation and dissipation in active positional basins”, *Abstracts of the 99th Annual Meeting of the Geo. Soc. Am.*, pág. 586.
- ENGELDER, T., y BETHKE, C. M. (1986): “Reexamination of the Gulf Coast Model used by Rubey-Hubbert hypothesis for thrust belt tectonics”, *Abstracts of the 99th Meeting of the Geol. Soc. Am.*, pág. 594.
- FREEZE, R. A., y BACK, W. (1983): “Physical Hydrogeology”, *Hutchingson Ross Pub. Co.*, 431 pág.
- FREEZE, R. A., y CHERRY, J. A. (1979): “Groundwater”, Prentice Hall, 604 págs.

- GARVEN, G., y FREEZE, A. (1984): "Theoretical analysis of the role of groundwater flow in the genesis of stratabound ore deposits", *Am. J. Sci.* 284, págs. 1085-1174.
- GARVEN, G. (1985): "The role of regional fluid flow in the genesis of the Pine Point deposits, Western Canada Sedimentary Basin", *Econ. Geol.*, vol. 80, núm. 2, págs. 307-324.
- HARRISON, W., y BETHKE, C. M. (1986): "Paleohydrology Analysis of Interacting Meteoric and Compactional Flow Regimes in the U.S. Gulf Coast", *Abstracts of the 99th Annual Meeting of the Geol. Soc. Amer.*, pág. 630.
- HANOR, J. S. (1986): "Evidence of large-scale vertical overturn of pore fluids in the Louisiana Gulf Coast", *Abstracts of the 99th Annual Meeting of the Geo. Soc. Amer.*, pág. 627.
- HAYMAN, R. M., y McDONALD, K. C. (1985): "The Geology of deep-sea hot springs", *American Scientist*, vol. 73, págs. 441-449.
- HIGGINS, C. G. (1984): "Piping and sapping: development of landforms by groundwater outflow", en *Groundwater as a Geomorphic Agent*, La Fleur (ed.), Allen and Unwin, Boston, págs. 18-56.
- HUBBERT, M. K., y RUBEY, W. W. (1959): "Role of Fluid Pressures in Mechanics of Overthrust Faulting", *Bull. Geol. Soc. Amer.*, vol. 70, págs. 115-166.
- IGLESIAS, A. (1985): "Usos y Aplicaciones del Agua en España", *Bol. Geol. y Min.*, tomo XCVI-V, págs. 512-540.
- INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA (1985): "Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en España. Informe y síntesis", 3 volúmenes.
- JIMÉNEZ SALAS, J. A. (1982): "Aportaciones científicas españolas a la Geotecnia", Discurso de ingreso en la Real Academia de Ciencias Matemáticas, Físicas y Naturales, 83 págs.
- JUSTO, J. L. DE, y SERRANO, A. (1981): "Geotecnia y Cimientos", Edit. Rueda.
- JONES, J. A. A. (1981): "The Nature of soil piping: a review of research", *Geomorphol. Res. Group.*, 301 pág. Norwich.
- JUAN PABLO II (1983): "Discurso a la Pontificia Academia de Ciencias", 12 noviembre 1983.
- LANGMUIR, D., y MAHONEY, J. (1984): "Chemical Equilibrium and Kinetics of Geochemical Processes in Groundwater Studies", *Proc. First Canadian/American Conference on Hydrogeology Nat.*, Water Well Association, págs. 69-95.
- LEHR, J. H. (1986): "A generation of aquifer-analyzing illiterates", *Groundwater*, vol. 24, núm. 5, págs. 594-596.

- LLAMAS, M. R. (1967): "Sobre el papel de las aguas subterráneas en España", *Agua*, julio-agosto 2-19.
- (1968): "Los estudios regionales de recursos hidráulicos totales", *Boletín de Información del Servicio Geológico de Obras Públicas*, vol. 123, págs. 17-23.
- (1974): "Motivaciones extraeconómicas en la explotación de aguas subterráneas", *Agua*, vol. 82, págs. 29-36.
- (1976): "La utilización de aguas subterráneas en Madrid: de los 'Mayrat' musulmanes a los modelos digitales", *Estudios Geológicos*, vol. 32, págs. 121-139.
- (1983): "The Role of Groundwater in Spain's Water Resources Policy", *Proc. of the Fourteenth Biennial Conference on Ground Water*, California Water Resources Center, Univ. of California, vol. 56, págs. 18-36.
- (1984a): "Consideraciones sobre la 'Nueva-Vieja' Política Hidráulica del Ministerio de Obras Públicas", *Actas del I Congreso Español de Geología*, vol. 4, págs. 123-137.
- (1984b): "Política Hidráulica y Génesis de Mitos Hidráulicos en España", *Cimbra*, dic., núm. 218, págs. 16-25. Publicado también en Simposio Nacional sobre Bases para el Establecimiento de Políticas Hidráulicas. Escuela de Ingenieros de Caminos, Santander, págs. 42-61.
- (1985): "Hydrogeology of Rocks of Low permeability: Regional Studies", *Memoires of the Int. Assoc. of Hydrogeologists*, núm. 17, vol. 2, págs. 547-561.
- (1986): "Las aguas subterráneas de Madrid: Esperanzas y preocupaciones, datos e incertidumbres, posibles líneas de acción", Plan Integral del Agua en Madrid, *Comunidad de Madrid, Monografías*, vol. 12, págs. 11-36.
- (1987a): "The Role of the International Association of Hydrogeologists", *Environmental Geology*, vol. 9, núm. 2, págs. 67-69.
- (1987b): "Las aguas subterráneas en la nueva Ley de Aguas Española", *Tecnología del Agua*, núm. 41, págs. 54-67.
- (1988): "Consideraciones sobre las tendencias y necesidades en la investigación hidrogeológica española", Ponencia invitada en el IV Simposio de Hidrogeología, Palma de Mallorca, octubre 1987, *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, vol. XIII (en prensa).
- y LÓPEZ CAMACHO, B. (1975): "Aplicación de un modelo digital al estudio del flujo de las aguas subterráneas de las calizas cretácicas de Torrelaguna (Madrid)", *Estudios Geológicos*, vol. 31, págs. 799-810.

- LLAMAS, M. R., y COLETO, I. (1984): "Nuevas consideraciones sobre la estadística española de usos de agua", *Actas del I Congreso Español de Geología*, tomo 4, págs. 215-224.
- LLAMAS, M. R., y CUSTODIO, E. (1985): "El proyecto de la Ley de Aguas", *Informe científico-técnico*, Instituto de Estudios Económicos.
- (1988): "Groundwater in Europe. Spain", *Division of Natural Resources and Energy*, United Nations, New York (en prensa, preprint 50 págs.).
- LLAMAS, M. R.; RODRÍGUEZ ARÉVALO, J.; TENAJAS, J., y VELA, A. (1987): "El Parque Nacional de Doñana: El Medio Físico", en *Bases Científicas para la Protección de los Humedales en España*, Real Academia de Ciencias, Madrid, págs. 147-172.
- L'VOVICH, M. I. (1979): "World Water Resources and their Future", American Geophysical Union. Washington, 415 págs.
- MARGAT, J. (1987): "Les trois stades de l'économie de l'eau", *Proc. of the International Symposium Water for the Future, Intern. Assoc. Sci. Hydrol.*, Pub. núm. 164, págs. 47-51.
- MARTIN MENDILUCE, J. M. (1975): "Las disponibilidades de recursos hidráulicos en España y el papel real de las aguas subterráneas", *Hidrología*, abril-junio, págs. 1-229, Madrid.
- MARTÍNEZ, M. L. (1987): "El Plan Nacional de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico", *Política Científica*, Ministerio de Educación y Ciencia, núm. 10, págs. 3 y 4.
- MARTÍNEZ ALVAREZ, J. A. (1974): "Consideraciones sobre el estudio del comportamiento de los fluidos en el medio geológico (Geofluidología)", *Bol. Geol. y Minero*, tomo 85-6, págs. 674-684.
- MARSILY, G. DE (1986): "Quantitative Hydrogeology", Academic Press, 440 págs.
- MATTHESS, G. (1982): "The Properties of Groundwater", John Wiley, 406 págs.
- (1987): "Advances in modelling water-rock interaction in aquifers", Proc. NATO Advanced Research Workshop on "Advances in Analytical and numerical groundwater flow and quality modelling, Lisbon, June 1987 (en prensa).
- MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y URBANISMO (1982): "Política Hidráulica y Planificación Hidrológica Nacional", *Boletín de Información del MOPU*, núms. 296/197, págs. 9-32.
- MOLTZ, F. J. (1987): "Microbial processes and Subsurface contaminants", *Eos*, pág. 204.
- MOORE, J. (1987): "Job outlook is good for hydrogeologists", *Episodes*, may, pág. 15.
- NEUZIL, C. E. (1986): "Problems of long-term deformation of basin fill

- and transient flow of pore fluids”, *Abstracts of the 99th Annual Meeting of the Geo. Soc. Am.*, pág. 705.
- NORTON, D., y KNIGHT, J. (1977): “Transport phenoma in hydrothermal systems: cooling plutons”, *Am. J. Sci.*, 277, págs. 937-981.
- OLIVER, J. E. (1986): “Cocorp and fluids in the crust”, *Abstracts of the 99th Annual Meeting of the Geo. Soc. Amer.*, pág. 711.
- PALMER, A. N. (1984): “Geomorphic interpretacion of Karst features”, en *Groundwater as a Geomorphic Agent*, La Fleur (ed.), Boston, págs. 173-208.
- RAOUL, J. (1987): “Water an related resources, past, present and future”, *Proc. Intern. Symp. on Water for the Future, Intern. Assoc. Scien. Hydr.*, Pub., núm. 164, págs. 65-78.
- ROELOFFS, E., y RUDNICKI, J. M. (1985): “The effect of Fault plane impermeability on pore pressure changes induced by propagating creep events”, *Eos*, vol. 67, núm. 16, pág. 272.
- RONA, P. A.; KLINKHAMMER, G.; NELSEN, T. A.; TREFRY, J. H., y ELDERFIELD, H. (1986): ““Black smokers, massive sulphides and vent biota at the Mid-Atlantic Ridge”, *Nature*, vol. 321, págs. 33-37.
- RODRÍGUEZ ARÉVALO, J., y LLAMAS, M. R. (1986): “Groundwater Development and Watertable variation the Doñana National Part (Spain)”, *Memoires of the International Association of Hydrogeologists*, vol. 19, págs. 203-211.
- ROJSTACZER, S. (1986): “Pore pressure development in areas of activ faulting: inferences from induces seismicity studies and state of stress measurements”, *Abstracts of the 99th Annual Meeting of the Geol. Soc. Amer.*, pág. 732.
- SAMPER, F. J. (1986): “Statistical Methods of Analyzing Hydrochemical Isotopic and Hydrological Data from Regional Aquifers”, *Ph. D. Dissertation*, University of Arizona, Tucson, 529 págs.
- SANFORD, W. E., y KONIKOW, L. F. (1985): “A two-constituent-solute-transport model for ground water having variable density”, *Water Resources Investigation Report 85-4279*, U. S. Geological Survey, 88 págs.
- SENGER, R. K.; KREITLER, C. W., y FOGG, G. F. (1986): “Influence of tectonic and geomorphic events on hydrodynamic development of Palo Duro basin, Texas”, *Abstracts of the 99th Annual Meeting of the Geo. Soc. Amer.*, pág. 745.
- SIGURDSSON, H. (1987): “Lethal gas burst from Cameroun Crater Lakes”, *Eos*, págs. 570-572.
- SIMÓN, J. L. (1980): “The ultimate resource”, Princeton University Press, 415 págs. (versión española por Dossat, Madrid).

- SOREY, M. L. (1986): "Evolution of the hydrothermal convection system at Lassen Volcanic National Park", *Eos*, vol. 67, núm. 16, pág. 272.
- TAYLOR, H. P. (1986): "O-18/O-16 Evidence for deep circulation of surface waters and formation of low O-18 magmas in regional rift-zone hydrothermal environments", *Abstracts of the 99th Annual Meeting of the Geo. Soc. Amer.*, pág. 770.
- TOTH, J. (1984): "The Role of Regional gravity flow in the chemical and thermal evolution of groundwater", *Proc. of the First Canadian/American Conference on Hydrogeology*, National Water Well Association, Worthington, Ohio, págs. 3-38.
- (1986a): "Models of Subsurface Hydrology of Sedimentary Basin", *Abstracts of the Third Canadian/American Conference on Hydrogeology*, National Water Well Association, pág. 2.
- (1986b): "Basin ydraulics and depositis of petroleum", *Abstracts of the 99th Annual Meeting of the Geo. Soc. Amer.*, pág. 774.
- U. S. GEOLOGICAL SURVEY (1985): "National Water Summary 1984", Water-Supply Paper 2275, 467 págs.

DISCURSO DE CONTESTACION
DEL
EXCMO. SR. D. JOSE MARIA FUSTER CASAS

Excmo. Sr. Presidente, Señores Académicos, Señoras y Señores:

Acabamos de escuchar una magistral exposición sobre las aguas subterráneas que, junto con las superficiales, son el más importante recurso de que disponemos. Es éste un tema, que tratado no solamente en sus aspectos científicos, sino también en sus implicaciones sociales, justifica plenamente el papel de los científicos en el mundo en que vivimos. Así se ha hecho y de ello todos podemos congratularnos.

Yo, que me dedico más a otro elemento de los de la terminología clásica, al fuego, representado por los magmas fundidos que de vez en cuando llegan a la superficie en el curso de las erupciones volcánicas, sería la persona menos indicada para contestar al Profesor Llamas dentro del terreno que él domina, pero aún así me alegro de que la Academia me haya atribuido este honor, ya que me va a dar ocasión para insistir, una vez más, como ya lo ha manifestado el Profesor Llamas, la interrelación absoluta que existe entre las más variadas disciplinas científicas cuando se trata de estudiar y explicar los productos o procesos naturales.

Pero antes debo cumplir con el gratísimo deber de informar a esta concurrencia por qué la Academia eligió al Profesor Llamas entre sus miembros. Lo haré muy escuetamente, tanto por respetar la natural modestia del nuevo Académico, como porque cuando se habla de personas que llegan con un apretado historial investigador académico y profesional reconocido por la comunidad científica nacional e internacional, casi sobran las alabanzas y los detalles.

No voy a abrumarles por ello con una reseña de los más de 130 trabajos científicos publicados en las revistas españolas e internacionales

más prestigiosas de la especialidad, ni de su participación en la redacción de cinco monografías, entre ellas el texto más completo de hidrología subterránea publicado en todo el mundo, ni de los 80 informes sobre problemas concretos de obras públicas o hidrogeología, ni de la impresionante actividad desarrollada en grupos de trabajo nacionales e internacionales a través de sus contactos y experiencias en los más acreditados centros de investigación hidrológica en Europa y Norteamérica. No en balde la Asociación Internacional de Hidrogeólogos le eligió Presidente en el XXVII Congreso Geológico Internacional, que se celebró en Moscú en 1984.

Me interesa más destacar solamente tres facetas, que fuera de las relaciones numéricas de todo *curriculum vitae*, sirven más para valorar la talla de un científico:

La primera, su dominio y soltura en las muchas disciplinas científicas (geología, geoquímica, dinámica de fluidos, etc.) que le permiten profundizar de verdad, valga el retruécano, en el problema de la localización y distribución de las aguas subterráneas. Pienso que este dominio, en parte, es debido a su doble condición de geólogo e ingeniero, y también a que como profesional ha tenido que tratar multitud de situaciones reales, además de buscar, como profesor e investigador en la Universidad y Consejo Superior de Investigaciones Científicas, los más íntimos mecanismos que condicionan la distribución y dinámica del agua subterránea.

La segunda, su generosidad, que en el caso de un científico no sólo se manifiesta por transmitir lo que uno sabe, sino por saber infundir a los que le rodean los suficientes ánimos y estímulos que al final redundan en la creación de una escuela que continúa la labor del pionero. Las más de 20 tesis de licenciatura, la decena de tesis doctorales presentadas y otras en curso de elaboración, los muchos profesores o profesionales que en España o fuera de ella continúan su labor, acreditan esta generosidad.

Por último, y para mí es una de las cualidades que más admiro, su preocupación constante por las repercusiones sociales de la Ciencia que cultiva. Llamas es la antítesis del tópico tan manido del científico encastillado en su torre de marfil. No duda nunca de exponer sus puntos de vista cuando estén en contradicción con otras opiniones, o cuando las decisiones que en el caso de las aguas subterráneas pueden acarrear importantes consecuencias económicas, sociales o ecológicas; y lo hace valerosamente, aun a sabiendas de que en este país desfacer entuertos acarrea muchas veces volteaos de aspas de molino y no pocos sinsabores. Menos

mal que en este país de los entuertos tenemos de vez en cuando desface-dores.



En la completa panorámica trazada por el Profesor Llamas sobre el papel del agua subterránea en los procesos geológicos, se ha introducido en las zonas más profundas de la litosfera, en donde como consecuencia de la elevación de temperaturas y del cambio de las condiciones b́aricas, el agua empieza a jugar un papel fundamental en los ciclos de distribución de sustancias susceptibles de formar yacimientos minerales. También ha mencionado el importante papel que en las regiones volcánicas puede tener el agua en algunos episodios explosivos que se denominan freato-magmáticos o hidromagmáticos.

Me van a permitir por ello que refuerce las ideas apuntadas por el nuevo académico y les hable un poco más sobre el hidromagmatismo, es decir de la interacción del agua y los magmas en los procesos volcánicos, uno de los temas de mayor actualidad en el campo de la Vulcanología. En este tema confluyen, además de la metodología observacional y geológica, una importante dosis de conocimientos teóricos y empíricos dentro de los campos de la termodinámica e hidrodinámica de sistemas no en equilibrio, así como la experimentación en el laboratorio con mezclas de agua y análogos de magmas.

En Vulcanología se ha superado una época en donde las erupciones freatomagmáticas se consideraban como algo diferentes de las erupciones puramente magmáticas, a otra, la actual, en que en prácticamente en cualquier erupción se comprueba que existe un componente freatomagmático más o menos importante (Sheridan y Barberi, 1983; Fisher y Schmincke, 1984; Cas y Wright, 1987).

El tema del hidromagmatismo tiene interés en dos direcciones: una, porque cada vez es más evidente que la dinámica eruptiva está en mayor o menor grado condicionada por la interacción de los magmas con las aguas superficiales, especialmente en aquellas erupciones en las que se produce mayor transferencia de energía térmica en energía cinética, es decir, en las más destructivas. Así, las más famosas erupciones de épocas históricas, como la del Santorini en la época Minoana, o la del Vesubio en el año 79 de nuestra era, o la del Krakatoa en 1883, fueron erupciones hidromagmáticas o con episodios hidromagmáticos destructivos. También puede servir de ejemplo el que las erupciones más conocidas de la década

en que estamos, Saint Helens en Estados Unidos, Chichón en Méjico o Nevado del Ruiz en Colombia, han sido también erupciones en donde la inter-acción agua-magma ha desencadenado una serie de procesos catastróficos con triste balance de muerte y destrucciones.

El otro motivo de interés que justifica el estudio renovado del hidromagmatismo es el que existe una profunda analogía entre los fenómenos de transferencia térmica, desarrollo de energía cinética, explosividad y dispersión de los productos fragmentarios volcánicos, y los accidentes que pueden producirse en metalurgias cuando los materiales de fundición entran accidentalmente con el agua; también porque en las centrales nucleares, el temido “melt-down”, es decir, la fusión accidental del subsuelo por el combustible nuclear, puede generar también, si estos magmas no naturales entran en contacto con el agua y rocas permeables, fenómenos explosivos freatomagmáticos con dispersión importante de materiales fundidos evidentemente muy peligrosos. No en balde la mayor parte de la experimentación que se realiza sobre interacción agua-materiales fundidos análogos a los magmas se está realizando en Sandía y en el Laboratorio Nacional de Los Alamos de la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos.

La posibilidad de que los magmas volcánicos entren en contacto con el agua es grande: penetración de lavas en zonas costeras o lacustres; erupción volcánica en los fondos marinos o bajo casquetes de hielo en zonas glaciares; penetración de masas fundidas en sectores donde existen acuíferos superficiales o profundos o bien en sistemas convectivos o hidrotermales. En todos los casos nos encontramos con un sistema de dos fases en el que hay una transferencia de energía térmica del magma al agua, el cual se transforma en vapor a alta presión, que a su vez es susceptible en el proceso de descompresión de realizar un trabajo. Si la descompresión se realiza explosivamente, el trabajo se aplica a la fragmentación del magma y de las rocas sólidas inmediatas al sector de interacción, las cuales se dispersan a elevada velocidad en parte hacia la atmósfera y en parte a ras del suelo en torno al punto de explosión en mecanismos cuya dinámica no tendremos tiempo de analizar.

Los datos de observación de numerosas erupciones hidromagmáticas, y los análisis termodinámicos y de dinámica de fluidos, ponen de manifiesto que no siempre que existe un contacto magma-agua se llega a la situación de expansión explosiva del vapor generado, es decir, en función de la existencia de unas condiciones límites, la explosividad, o sea, la peligrosidad de las erupciones hidromagmáticas es mayor o menor.

En un primer análisis teórico, confirmado por los experimentos con mezclas de termita-agua, se llega a la conclusión de que la eficacia destructiva del sistema, medida por el cociente entre el trabajo debido a la expansión y la energía térmica del magma, es máxima cuando la relación agua-magma está situada en torno a 0,35, es decir, tanto si hay poca agua implicada en la interacción, como si hay mucha, la explosividad disminuye; por ello, cuando las lavas fundidas penetran en el mar, en la mayor parte de los casos no suelen producirse otros fenómenos que la evaporación no explosiva del agua. Por el contrario, en tierra firme, cuando los magmas en su ascenso a la superficie atraviesan acuíferos en los que hay escasa transmisividad, la cantidad de agua que puede entrar en la zona de interacción es reducida, no alcanzándose los valores críticos de eficacia necesarios para originar explosiones. El agua que, procedente del acuífero, se evapora se agrega a los gases magmáticos sin que se produzcan modificaciones importantes en la dinámica eruptiva, de carácter fundamentalmente magmático. Wohletz (1986) ha puesto también de manifiesto mediante cálculos termodinámicos, que cuando el vapor de agua formado tiende a equilibrarse a la presión atmosférica pueden darse dos situaciones extremas: una, cuando el vapor se separa del magma, en que tiene lugar una expansión isentrópica del vapor (situación adiabática) y otra en que durante el proceso de expansión las partículas de magma (piroclastos) y el vapor que se forma permanecen en contacto, suministrando calor al vapor de una manera continua. En este último caso que se da cuando los piroclastos son suficientemente pequeños, las dos fases tienen la misma temperatura, comportándose la mezcla isentrópicamente, aunque el vapor aumente de entropía. La "eficacia" explosiva del sistema es en este último caso, que puede llamarse isotérmico, del orden de un 40 por 100 más elevada que en la situación adiabática. El que se esté más cerca o más lejos de estas dos situaciones ideales depende, entre otros factores, de los mecanismos íntimos que tienen lugar en la interfase agua-magma.

Cuando el magma y el agua entran en contacto, en la interfase se origina una película de vapor que se expande mientras que la superficie externa del magma se enfría. La expansión del vapor continúa hasta un límite en que se produce la condensación, pasando este film a una fase subsiguiente de contracción. Las expansiones y contracciones del film provocan inestabilidades de tipo Landau (formación de vértices causados por ebullición) o de tipo Taylor (deformaciones ondulatorias superficiales) que originan irregularidades en la superficie del magma que terminan por separarse, formando pequeñas gotículas que quedan incorporadas a la interfase de vapor. El proceso pulsante de expansión y contracción se repite en fracciones de tiempo muy reducidas, milisegundos a microse-

gundos, aumentándose progresivamente la superficie específica y la eficacia del transporte de calor. Mediante este mecanismo se crean unos gradientes térmicos entre el magma y el agua líquida calentada a través de la película de vapor. Si la temperatura del agua supera la necesaria para la nucleación espontánea homogénea (ebullición instantánea generalizada) para las condiciones de presión existente, puede originarse una explosión por transformación rápida de la masa de agua implicada en vapor.

También puede provocarse esta generación casi instantánea de vapor cuando una onda de presión de origen externo, como puede ser una onda sísmica, acelera la producción de vapor al provocar mayor fragmentación y al romper las películas de vapor en torno a los fragmentos que siempre tienen un cierto carácter aislante. Pueden así originarse detonaciones térmicas que avanzan hacia el interior del líquido provocando también su transformación masiva en vapor.

En una denotación de este tipo la onda de choque deja detrás una mezcla de vapor y fragmentos finos, en donde la velocidad del vapor es mayor que la de los fragmentos; cuando la diferencia entre ambas es suficientemente grande, del orden de 60 m/s., pueden producirse fenómenos explosivos, con dispersión hacia el exterior del vapor, de los fragmentos magmáticos y de los fragmentos de las rocas sólidas fracturadas por la explosión.

Un factor que condiciona en gran manera las posibilidades de generación de erupciones hidromagmáticas es la presión confinante que existe en el lugar donde tenga lugar la interacción. En las erupciones submarinas una limitación absoluta al proceso hidromagmático es la presión crítica del agua, que se alcanza aproximadamente a algo más de los 2.000 metros de profundidad, por lo que a partir de esta profundidad no puede generarse vapor. Aun así, para presiones y profundidades subcríticas, el punto de ebullición, que es de 374^o C a la presión crítica, desciende ligeramente hasta presiones del orden de 2,5 MPa (unos 250 metros de profundidad); como al mismo tiempo la densidad del vapor a estas presiones es bastante elevada, la magnitud de expansión es mucho más reducida que a la presión ordinaria. Por consideraciones teóricas, se llega a la consecuencia que el límite superior de presión para que pueda producirse ebullición homogénea generalizada e instantánea es de 1,3 MPa, que equivalen a 130 metros de profundidad de agua.

De la misma forma en las zonas no cubiertas por el agua con acuíferos confinados profundos, la presión crítica del agua se alcanza a profundi-

dades 2,5 veces menores que en el agua oceánica debido a la diferencia de densidades entre el agua y las rocas sólidas del subsuelo. Muchos fenómenos hidromagmáticos son, por este factor limitante de la presión, fenómenos relativamente superficiales.

Con estos datos teóricos están de acuerdo las observaciones vulcanológicas. Así la profundidad de los cráteres formados en erupciones freatomagmáticas, que se supone que está cercana al nivel de la explosión del vapor, es, por término medio, de 91 ± 67 metros, con valores más frecuentes en torno a los 60 metros y valores máximos de profundidad poco frecuentes, que no llegan a los 400 metros (Pike y Clow, 1981).

El efecto limitador de la presión confinante sobre las posibilidades de generación de explosiones hidromagmáticas no sólo se debe a factores termodinámicos, pues en último término la posibilidad de expansión violenta del vapor de agua está limitada por la resistencia mecánica de los materiales sólidos que existen entre la zona de generación de vapor y la superficie, así como por las condiciones de estanqueidad de este recubrimiento. Para que exista expansión y salida del vapor se requiere que su presión sea superior a la resistencia de los materiales o que por causas externas se produzca una fisuración de los mismos que ponga en contacto con la atmósfera las zonas donde está acumulado el vapor. Con frecuencia esto puede desencadenarse por los movimientos sísmicos asociados a los procesos de ascenso magmático o por la deformación ocasionada en el recubrimiento por el propio empuje magmático. Tal ocurrió en Saint Helens en 1980, en donde la explosión inicial destructiva que desencadenó el resto de los episodios eruptivos fue originada por la brusca descompresión del sistema hidrotermal que existía en las zonas altas del volcán por fisuraciones seguidas de avalanchas que provocaron un descenso brusco de la presión de todo el sistema.

En el somero análisis que hasta ahora hemos realizado, se ha considerado al magma como una simple fuente de calor y a los fenómenos hidromagmáticos explosivos como una consecuencia de la transformación de la energía térmica transferida al agua en energía cinética debida a la expansión violenta del vapor al llegar a las condiciones de la superficie. El análisis puede ser válido cuando estamos en presencia de magmas, que como los basálticos, en general tienen en disolución una proporción reducida de componentes volátiles antes de llegar a los niveles donde puede tener lugar la interacción explosiva con el agua.

Sin embargo, en la naturaleza son también muy frecuentes los magmas que contienen en disolución una proporción muy elevada (unas pocas

unidades por ciento) de productos volátiles, en su mayoría agua. Se trata de un agua, cualquiera que sea su procedencia última, que no tiene que ver nada con el agua superficial sea de la hidrosfera, sea de los acuíferos en donde está contenida.

En estos magmas, durante el proceso de ascenso a la superficie, se cruza la curva de solubilidad de los gases en el magma, desprendiéndose el exceso de volátiles en forma de burbujas que ocupan progresivamente un volumen mayor en el sistema a medida que la presión desciende durante el ascenso. Puede llegarse, dentro del conducto, a una situación en donde la expansión interna represente un volumen aproximado del 80 por 100, es decir, el magma se ha transformado en una verdadera espuma, en donde la presión interna de los gases puede rebasar la tensión superficial de las paredes de las vacuolas. En esta situación, que se da en magmas viscosos, el continuo de magma con gases dispersos pasa a un continuo de gases en expansión con fragmentos dispersos de las paredes de las burbujas y fragmentos de lava muy vacuolar. La profundidad de este nivel de fragmentación varía como es lógico en función de las condiciones específicas de cada magma, aunque una vez establecida la comunicación con la superficie, tenderá a ser más profundo como consecuencia del descenso de presión y carga litostática en la propia columna. Esta situación, que es la característica de las erupciones plinianas, en honor de Plinio el Joven, que en sus cartas a Tácito describió la erupción del Vesubio en el año 79, origina un chorro de partículas que se proyecta en la atmósfera hasta a veces varias decenas de kilómetros y que se dispersa en torno al punto de salida, como lluvias piroclásticas secas o como coladas piroclásticas que irradian desde el punto de emisión.

Las variaciones del contenido en gases del magma que asciende, y las propias modificaciones dinámicas del proceso, hacen que en el curso de una erupción pliniana el nivel de fragmentación pueda oscilar ampliamente dentro del conducto. Existiendo en profundidad niveles freáticos, podemos encontrarnos con las más variadas situaciones freatomagmáticas. Si el nivel de fragmentación está por encima del acuífero, las posibilidades de interacción del agua y el magma, aun continuo en el conducto, serán reducidas. Si el nivel de fragmentación magmático coincide con el acuífero, las posibilidades de intercambio térmico, entre el agua y un magma ya reducido a fragmentos muy diminutos es máxima, pues se está en condiciones óptimas de transferencia térmica. Si el nivel de fragmentación magmática desciende por bajo del nivel del acuífero y el acuífero tiene una elevada transmisividad se puede producir además del intercambio térmico un efecto de succión del agua contenida en las rocas permea-

bles con un aumento progresivo de la tasa de vapor de origen externo al magmático.

Como estas oscilaciones del nivel de fragmentación magmática pueden producirse en el curso de una sola erupción, es posible diferenciar en ella fases en las que predomina una dinámica puramente magmática (plinianas) y períodos caracterizados por una dinámica hidromagmática (freato-plinianos). A su vez, en estos últimos pueden existir situaciones de máximo aporte de vapor de origen externo, en que durante la expansión y dispersión puede producirse la condensación subsiguiente, y situaciones en donde las condiciones termodinámicas durante el proceso de dispersión permitan la persistencia de vapor no saturado.

En cada situación, las dimensiones, morfología y naturaleza de los fragmentos que se dispersan, tanto los magmáticos como los de rocas sólidas existentes en las zonas de interacción explosiva, son diferentes y característicos. También son diferentes los mecanismos de dispersión y depósito en torno a los centros eruptivos. A su vez estos mecanismos tienen una tasa menor o mayor de peligrosidad. Por ejemplo, durante la famosa erupción del año 79 del Vesubio Pompeya (Sigurdsson et al. 1985) quedó enterrada por una lluvia pliniana seca, que en principio permitiría huir a una gran parte de los habitantes. Los episodios freato-magmáticos subsiguientes, mucho más peligrosos, provocaron la destrucción de Herculano, afectado por oleadas rasantes de alta velocidad generadas-inicialmente por interacción del magma con un acuífero profundo.

Es posible hoy, mediante un análisis cuidadoso de los productos de erupciones volcánicas pretéritas, reconstruir la dinámica de un determinado centro eruptivo, y de acuerdo con ello tratar de evaluar la probabilidad de determinados comportamientos futuros de ese volcán.

Se avanza así, mediante una cooperación íntima entre los análisis termodinámicos y dinámicos, experimentales y de observación interpretativa hacia el objetivo social de la limitación de los riesgos en zonas volcánicas activas, en las que con frecuencia la coexistencia no pacífica de los magmas de origen profundo y las aguas infiltradas desde la superficie refuerzan o desencadenan el fenómeno eruptivo.

Termino aquí animado al nuevo académico a que se introduzca en este sugestivo aspecto de las aguas subterráneas, donde queda tanto por hacer. Contará con mi cooperación y estímulo. Desde aquí, en nombre de esta Academia, le doy la más cordial bienvenida. Muchas gracias.

BIBLIOGRAFIA

- CAS, R. A. F., and WRIGHT, J. V. (1987): *Volcanic successions, modern and ancient*, Allen and Unwin, London, 528 págs.
- FISHER, R. V., and SCHMINCKE (1984); *Pyroclastic Rocks*, Springer-Verlag, Berlín, 472 págs.
- PIKE, R. J., and CLOW, G. D. (1981): "Revised classification of terrestrial volcanoes and catalog of topographic dimensions, with new results on edifice volume", *U. S. Geol. Surv. Open File Rep.*, 81-1038, 1-40.
- SHERIDAN, M. F., and BARBERI, F. (1983): *Explosive volcanism*, Elsevier, Amsterdam, 4481 págs.
- SHERIDAN, M. F., and WOHLTZ, K. H. (1983): "Hydrovolcanism: Basic considerations and review", *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 17, 1-30.
- SIGURDSSON, H.; CAREY, S. N.; CORNELL, W., and PESCATORE, T. (1985): "The eruption of Vesubius in A. D. 79", *Natl. Geogr. Res.*, I, 332-387.
- WOHLTZ, K. H. (1986): "Explosive magma-water interactions: Thermodynamics, explosion, and field studies", *Bull. Volcanol.*, 48, 245-264.
- and MCQUEEN, R. G. (1983): "Experimental studies of hydromagmatic volcanism", en *Explosive Volcanism*, págs. 158-169, National Academy, Washington.

INDICE

Introducción	11
La evolución histórica de los principales conceptos hidrogeológicos	15
Singularidad de las propiedades físicas y químicas de las aguas subterráneas	29
La cuantificación de fases y flujos del ciclo hidrológico en España	35
La investigación hidrogeológica en relación con el aprovechamiento y la protección del agua subterránea en España.....	41
El agua subterránea en los procesos geológicos.....	59
Consideraciones finales	73
Bibliografía.....	77
Discurso de contestación del Excmo. Sr. D. José María Fuster Casas	85