Ismael Herrera-Revilla y Ramiro Rodríguez Castillo

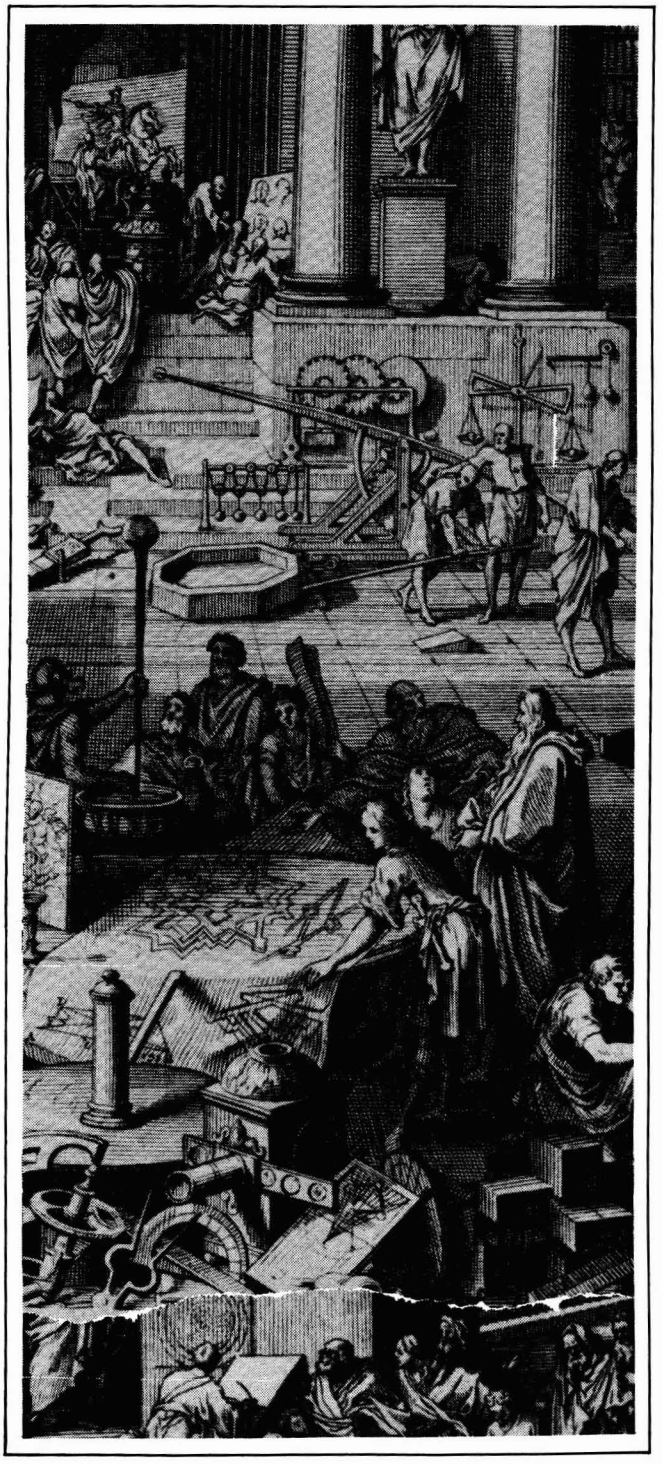
Agua Subterránea: Recurso y desafío

1. Introducción

El suelo que pisamos generalmente no es impermeable porque tiene huecos que permiten el paso del agua. No todo el espacio que ocupan los suelos está lleno de los granos que los forman, sino que hay intersticios vacíos que además de permitir la circulación de líquidos tales como el agua o el petróleo, tienen la capacidad de almacenarlos. A las formaciones del suelo y del subsuelo que permiten la circulación y tienen la capacidad de almacenar el agua se les llama acuíferos. El recurso que de esta manera se acumula es el agua subterránea. La hidrología del agua subterránea es la ciencia que estudia la afloración, distribución y movimiento a través de la superficie de la Tierra, de este recurso. Geohidrogeología es sinónimo de hidrología del agua subterránea. En cambio, el término hidrogeología tiene una significación ligeramente diferente, ya que esta disciplina pone su énfasis en la geología.

La explotación y desarrollo del agua subterránea datan de los tiempos más remotos. El Antiguo Testamento contiene numerosas referencias acerca del agua subterránea, de fuentes y pozos. Grandes túneles de agua subterránea construidos en Persia y Egipto 800 años antes de Cristo, han sido descritos por Tolman. Por otra parte, el agua subterránea constituye un recurso escondido que sólo en ocasiones se pone en evidencia a través de fuentes y manantiales, por lo que los fenómenos asociados han despertado el interés de los científicos y pensadores de todos los tiempos. Así, escritores y filósofos griegos y romanos trataron de explicar el origen de los manantiales y con mayor generalidad del agua subterránea, y sus teorías van desde la pura fantasía, hasta conjeturas más cercanas a la realidad, que constituyen valiosos antecedentes del conocimiento contemporáneo.

Homero y Platón creían que el agua que brotaba de las fuentes y manantiales provenía del mar, conducida por canales subterráneos a través de las montañas que la purificaban, de donde era llevada a la superficie. Aristóteles sugirió que el aire penetraba en las frías cavernas del interior de las montañas, donde se condensaba en agua. Mucho más realista fue el arquitecto romano Vitruvius, quien se adelantó a sus contemporáneos al sugerir la teoría de la infiltración, que es la concepción contemporánea del origen de este recurso.



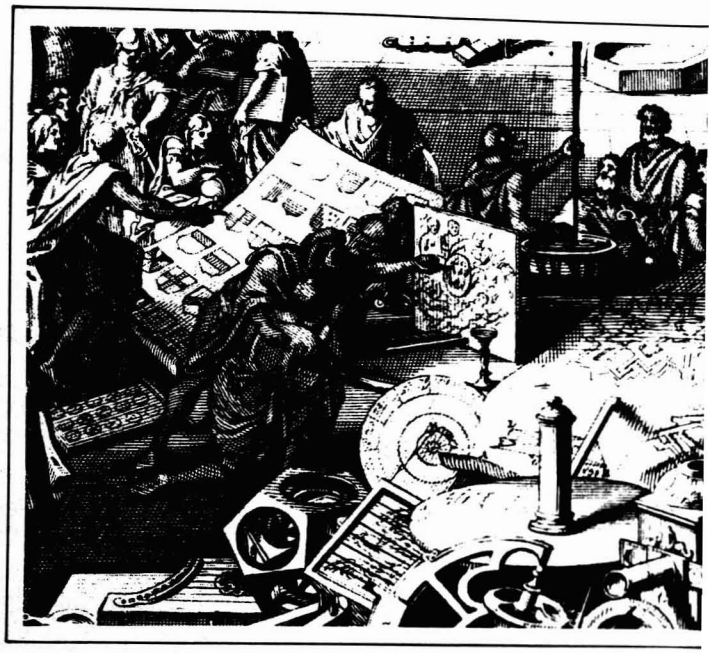
Instituto de Geofísica, UNAM

Sin embargo, el estancamiento intelectual característico de la Edad Media, afectó por igual a la geohidrología, por lo que no hubo avance hasta el final del Renacimiento. El alfarero y filósofo francés Bernard Palissy (1510-1589) revivió la teoría de la infiltración, pero no fue escuchado por sus contemporáneos. Todavía en la primera parte del siglo XVII no se creía que el agua de los manantiales pudiera derivarse del agua de la lluvia, porque se estimaba que la cantidad era insuficiente y que la tierra era demasiado compacta. El eminente astrónomo alemán Juan Kepler (1571-1630), en esta materia permitió que su imaginación dominara a su espíritu científico ya que sostuvo que la tierra se comportaba como un enorme animal, que bebía agua de los océanos, la digería, la asimilaba y luego, al final de estos procesos fisiológicos, la convertía en agua subterránea. Mejor estuvo, aunque no mucho, el matemático y filósofo francés René Descartes (1596-1650), quien a pesar de su grandeza como científico y pensador, optó por revivir la teoría de los griegos que sostenía que era el agua del mar, completada con procesos de vaporización y condensación dentro de la tierra, la que daba origen al agua subterránea.

Curiosamente, fue un abogado francés, Pierre Perrault (1608-1680), quien superó estas ideas de Descartes, lo que logró midiendo la lluvia caída durante tres años y calculando el desagüe de la cuenca superior del río Sena. En 1674 sus resultados mostraron que la precipitación en la cuenca era seis veces la descarga del río, con lo que probó que el volumen del agua de lluvia era compatible con la teoría de la infiltración. Los resultados de Perrault fueron confirmados por el físico francés Edme Marriotte (1620-1684). Fue así como la teoría de la infiltración se estableció en forma definitiva. A mayor abundamiento, el astrónomo inglés Edmund Halley (1656-1742), realizó 1693 medidas de la evaporación, demostrando que la evaporación del agua del mar era suficiente para explicar todos los manantiales y corrientes del mundo.

Durante el siglo XVIII se establecieron los fundamentos de la geología que permitieron mejorar la comprensión de los fenómenos asociados al agua subterránea. Posteriormente, en el siglo XIX, el ingeniero hidráulico francés Henri Darcy (1803-1858), estudiando el flujo del agua en arenas obtuvo un resultado de gran trascendencia, que hasta la actualidad ha constituido el ingrediente de los modelos matemáticos del flujo de fluidos a través de medios porosos. En su tratado de 1856 estableció la relación, conocida como Ley de Darcy, que permite deducir la velocidad de flujo cuando se conoce el gradiente hidráulico. A partir de entonces el desarrollo de la hidráulica subterránea ha sido vigoroso. Por la importancia de sus contribuciones merecen mención: Boussinesq, Dandrée, Dupuit, Forchheimer y Thiem. Posteriormente a ellos son Dachler, Imbeaux, Keilhack, Koehne, Kozeny y Prinz. Muchos de los progresos de la hidrología subterránea habidos en la primera mitad del presente siglo fueron motivados por O. E. Meinzer, quien impulsó a muchos hombres a investigar las aguas subterráneas.

Los progresos de la modelación matemática del flujo del agua y el transporte de sustancias en ella disueltas, pueden sin gran dificultad atribuirse a investigadores en forma específica, identificando las publicaciones en que han aparecido las fór-



mulas correspondientes. A partir de la contribución de Darcy ya mencionada, la hidráulica de pozos fue desarrollada sucesivamente por Dupuit (1863), Thiem (1870), Webwr, Theis (1935) y Jacob (1940). Los primeros modelos para la descarga del agua subterránea en ríos y lagos fueron desarrollados por Boussinesq (1905) y Maillet. Contribuciones fundamentales a los métodos generales para la simulación del flujo del agua subterránea fueron hechas por Forchheimer (1886), Muskat (1937) y Hubbert (1940), aunque posteriormente muchos más han participado en estos desarrollos. Aprovechando el rápido avance que ha habido en la computación electrónica, el progreso de la modelación matemática de los procesos que tienen lugar en el agua subterránea ha sido impresionante.

2. Ocurrencia del agua subterránea

Los estratos que están por debajo de la superficie son los que determinan la distribución de las aguas subterráneas. Por eso el conocimiento de la geología es el punto de partida para la comprensión de esa clase de recursos. A los huecos o intersti-

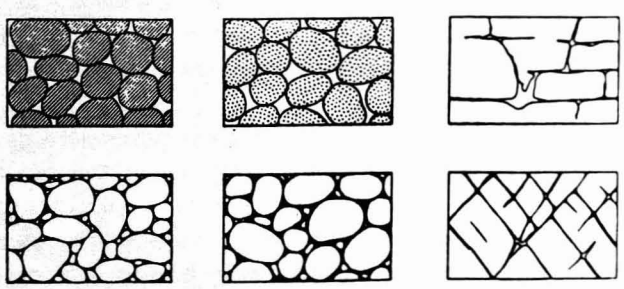


Figura 1 Tipos de porosidad

cios de una formación se les llama poros (Figura 1). En realidad, a la geohidrología le interesan solamente los que están interconectados, ya que los que se encuentran aislados resultan irrelevantes pues el agua que en ellos se encontrara estaría atrapada y sería incapaz de participar en la dinámica del sistema.

La magnitud de la porosidad de un estrato determina su capacidad para almacenar agua. Por lo que se refiere a la facilidad con que el agua transita o fluye a través de una formación, ella no está determinada exclusivamente por la porosidad, sino que depende de una combinación de factores que resultaría inapropiado pretender explicar en este breve artículo. Además, es necesario distinguir la capacidad de almacenar agua, la cual depende exclusivamente de la porosidad, de la capacidad para cederla, la cual depende además de la deformabilidad o elasticidad de la formación. El lector comprenderá fácilmente esta distinción si piensa en una esponja llena de agua. El volumen de líquido contenido en la esponja está determinado por el volumen de los poros, pero para extraerlo de la esponja es necesario que la esponja sea deformable. En particular, si la esponja fuera rígida sería imposible recuperar el agua contenida en ella.

La porosidad de los acuíferos puede tener orígenes diversos, como se muestra en la Figura 1. Los suelos y las arenas están formados por granos más o menos redondeados, incapaces de ajustarse perfectamente entre sí, por lo que necesariamente dejan huecos. En cambio los estratos formados por rocas ígneas o volcánicas, que en su estado original serían completamente impermeables, llegan a presentar una porosidad importante únicamente cuando están fracturados. Debido al elevado vulcanismo del territorio mexicano, este tipo de acuíferos es abundante en nuestro país. Otro ejemplo de formaciones abundantes en México, son las calizas. Ellas también en su estado original, son impermeables. Sin embargo, debido a procesos diversos parte del material que las forma puede ser disuelto desarrollando innumerables huecos, lo que les proporciona porosidad y permeabilidad considerables que las puede convertir en magníficos acuíferos.

Por otra parte, el agua puede llenar los poros de la matriz porosa o por el contrario puede no llenarlos. En el primer caso, se dice que el material está saturado. Por eso, en los acuíferos, se suele distinguir entre zonas saturadas y otras que no lo están. Generalmente la saturación varía en la dirección vertical (Figura 2), estando la parte más profunda del subsuelo saturada. A la parte más superficial, que no está saturada, se le llama zona de aireación. En ella los poros están ocupados por agua y aire. La altura del límite superior de la zona de saturación corresponde al nivel freático y la superficie freática es la que separa a la zona saturada de la zona de aireación.

A los acuíferos que están limitados superiormente por un estrato impermeable se les llama confinados (Figura 3) y cuando éste no es el caso decimos que el acuífero es libre. La distribución mostrada en la Fig. 2 corresponde a un acuífero libre. En cambio, los acuíferos confinados frecuentemente están saturados en toda su extensión, por lo que no hay zona de aireación ni existe superficie freática. Sin embargo, si en un acuífero confinado que está saturado hacemos una perforación, como se muestra en la Fig. 3, el agua se elevará hasta un nivel igual al que ocuparía la superficie freática si no existiera el confinamiento que la limita. A esta altura se le llama nivel

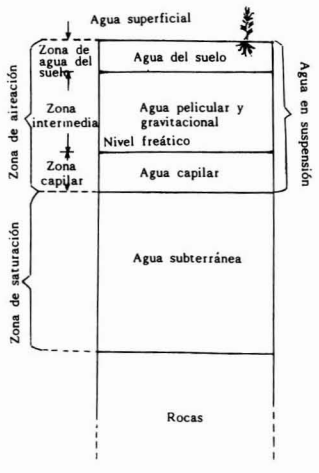


Figura 2 Distribución del agua en el subsuelo

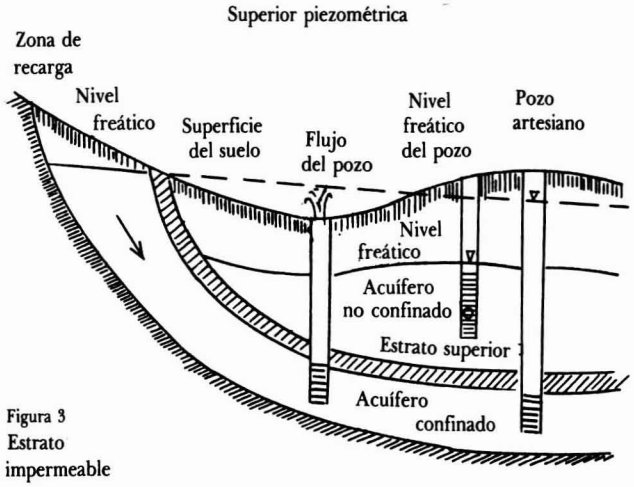


Figura 3 Estrato impermeable

piazométrico. Al respecto, es importante distinguir dos situaciones posibles: que el nivel piezométrico esté por debajo de la superficie del terreno o que por el contrario esté por encima de la misma. En el primer caso, al perforar un pozo el nivel se eleva hasta cierta altura en su interior, sin producirse ninguna manifestación superficial. En cambio, en el segundo caso el nivel del agua se elevará más allá de la boca del pozo dando lugar a un pozo brotante, también llamado artesiano. De paso esto aclara el misterioso origen de los manantiales o fuentes brotantes. Si en vez de existir un pozo, hubiera un fracturamiento o con mayor generalidad una comunicación de origen natural del acuífero con la superficie, la corriente que así se originaría se manifestaría como un manantial.

Los acuíferos libres, al no estar limitados superiormente por una capa impermeable están comunicados verticalmente con el exterior y pueden ser recargados por la lluvia que caiga en la superficie de la zona en que se encuentren. En el caso de los acuíferos confinados esto no es posible. El agua que contienen los acuíferos confinados y la recarga con que se recuperan cuando se les extrae el líquido contenido en ellos, proviene de zonas alejadas frecuentemente localizadas en las montañas, donde las formaciones que los constituyen emergen a la superficie (Fig. 3), Cuando la elevación de la montaña donde se recargan es superior a la del acuífero, eso mismo puede provocar que el nivel piezométrico sea mayor que la superficie del terreno donde subyace el acuífero. El fenómeno es esencialmente el mismo que el de los vasos comunicantes.

Pero no es ésta la única forma en que puede surgir un manantial. En ocasiones existen fracturas que llegan hasta grandes profundidades en la corteza de la Tierra donde, especialmente en zonas volcánicas, las aguas se ponen en contacto con magma a altas temperaturas. Se eleva así la presión y la temperatura de estas aguas subterráneas. La alta presión provoca que el nivel piezométrico se eleve por encima del nivel del terreno al que subyace el acuífero. Surge así una fuente termal, cuyas aguas suelen estar sumamente mineralizadas ya que disuelven muchos de los minerales de las rocas con que han estado en contacto. Si la presión es sumamente grande aparece un geyser o un campo goetérmico capaz de generar muchos kilovatios de energía. En el territorio mexicano abundan este tipo de manifestaciones, debido a su alto vulcanismo. En la actualidad los campos geotérmicos de Cerro Prieto, uno de los más grandes del mundo, y de los Azufres están siendo explotados para la producción comercial de electricidad, en los estados de Baja California y Michoacán, respectivamente.

3. Estudio del agua subterránea

El estudio del agua subterránea es eminentemente interdisciplinario. Como el agua se encuentra en un medio geológico su estudio requiere de un planteamiento que incluye en primer lugar la definición del tipo de roca en que ésta circula, la geometría y distribución de las unidades permeables e impermeables que conforman el acuífero. La localización y en general el conocimiento de las cuencas subterráneas se realiza por medio de estudios geológicos y geofísicos. La evaluación del potencial disponible y la predicción de su comportamiento, necesita del desarrollo de modelos matemáticos que se aplican por medio de las computadoras electrónicas. En casos como el de la Ciudad de México, esta clase de modelos permiten también predecir el hundimiento del suelo que provoca la extracción del agua subterránea.

Su calidad está controlada por factores tanto naturales como por otros que dependen de la actividad humana. Las interacciones químicas entre el agua y las formaciones geológicas que atraviesa son frecuentemente complejas. Aún más complejos son los procesos que controlan la contaminación antropogénica. El desarrollo industrial ha dado lugar a la generación de más de 40,000 compuestos orgánicos de carácter tóxico que pueden incorporarse al flujo subterráneo degradando la calidad del agua. Más de 5,000 de estos compuestos son producidos por la industria nacional. A pesar de todo esto, la calidad del agua subterránea es en general mejor que la del agua superficial, debido a que su vulnerabilidad a la contaminación es mucho menor. El cauce de un río llega a contaminarse fácilmente en tanto que en un acuífero es un proceso lento y más complejo. En el caso de la Ciudad de México, sus acuíferos están protegidos por una gruesa capa de arcilla, de poca permeabilidad que se extiende en el subsuelo.

La simulación computacional de los sistemas acuíferos es ya una herramienta necesaria en la planteación y administración de este recurso. Conocer la evaluación tanto de la cantidad como de la calidad, es indispensable para definir las políticas de explotación de los acuíferos. Es por eso que es necesario modelar con métodos matemáticos tanto el flujo como el transporte, ya que de este último depende la migración de los contaminantes.

Finalmente, la isotopía hidrológica (análisis isotópicos de Deuterio, Oxígeno-18, Trito, Carbono-14, Azufre-34, Radón, etcétera) ofrece resultados complementarios en estudios hidrogeológicos. Mediante ellos es posible conocer origen y edad de las aguas.

En países en vías de desarrollo como el nuestro, hasta hace un par de decenios bastaba con hacer una noria o un pozo medianamente profundo (50 m) para disponer del vital elemento, si es que no se contaba con un cauce superficial (río, arroyo, manantial o un reservorio natural (lago, laguna) de donde tomarlo sin mayor problema. La expresión "agua subterránea" era, y en algunas áreas aún sigue siendo, un término raro. Se llegaba a pensar en "ríos subterráneos", en "venas de agua" que circulan por donde Dios o la Madre Naturaleza dispone. Se le veía como un recurso escondido, inagotable, que está a la disposición de todos.

Como recurso no se le valora suficientemente. Muchos de nuestros compatriotas aún no se percatan de que su localización y aprovechamiento necesita de muchos estudios y de investigaciones científicas.

La Universidad debe jugar un papel importante en el mundo del agua subterránea. Su participación tanto en investigaciones tendientes a ampliar el conocimiento de los sistemas acuíferos, como en la formación de personal de alto nivel para la administración científica de este recurso subterráneo, constituyen un desafío que debemos atender para beneficio del país. ◊