

RECURSOS HIDROGEOLÓGICOS

Juan Gil Montes
Geólogo

RECURSOS HIDROGEOLÓGICOS

ÍNDICE:

1. CONCEPTOS BÁSICOS

- 1.1. Concepto de Hidrogeología.
- 1.2. Distribución del agua en la Tierra.
- 1.3. Importancia del agua subterránea.
- 1.4. El ciclo hidrológico global.
- 1.5. El balance hidrológico.
- 1.6. Recursos y reservas hidrológicos.

2. LOS ACUÍFEROS

- 2.1. Definición de acuífero.
- 2.2. Cuencas hidrogeológicas.
- 2.3. Parámetros hidrogeológicos:
 - Porosidad.
 - Permeabilidad.
 - Transmisividad.
- 2.4. Clasificación de los acuíferos.

3. HIDROGEOQUÍMICA

- 3.1. Relaciones entre la litología y la composición de las aguas subterráneas.
- 3.2. El movimiento del agua subterránea y su composición química.
- 3.3. Clasificación de las aguas subterráneas.

4. RELACIÓN ENTRE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LAS SUPERFICIALES

- 4.1. Los manantiales.
- 4.2. Clasificación de los manantiales.
- 4.3. Relaciones entre las escorrentías superficial y subterránea.
- 4.4. Modificaciones introducidas por la acción del hombre.

5. PROSPECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

- 5.1. Métodos de prospección de aguas subterráneas.
 - Métodos geológicos.
 - Métodos geofísicos.
- 5.2. Prospección de las aguas subterráneas en los distintos tipos de rocas:
 - Las aguas subterráneas en las rocas metamórficas
 - Las aguas subterráneas en las rocas graníticas
 - Las aguas subterráneas en las rocas filonianas
 - Las aguas subterráneas en las rocas calcáreas
 - Las aguas subterráneas en las rocas sedimentarias consolidadas
 - Las aguas subterráneas en las rocas sedimentarias no consolidadas

6. EXPLOTACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

6.1. Captaciones de aguas subterráneas:

- Pozos o perforaciones de pequeño diámetro.
- Pozos de gran diámetro.
- Pozos de drenes horizontales.
- Zanjas de drenaje.
- Galerías subterráneas.

6.2. Pruebas de bombeo: Aforos.

7. PROBLEMAS MEDIOAMBIENTALES DERIVADOS DE LA EXPLOTACIÓN

- 7.1. La sobreexplotación de los acuíferos
- 7.2. Consecuencias de la sobreexplotación
- 7.3. Medidas correctoras
- 7.4. La intrusión de las aguas marinas.
- 7.5. Los procesos antrópicos de contaminación de acuíferos.

1. CONCEPTOS BÁSICOS

1.1. Concepto de Hidrogeología

La Hidrología es la ciencia que trata de las aguas terrestres y se ocupa del estudio del ciclo completo del agua, desde el momento en que ésta cae desde la atmósfera a la tierra hasta que desemboca en el mar o vuelve a la atmósfera. El ciclo del agua se desarrolla en tres medios distintos: La atmósfera, la superficie del suelo y el subsuelo.

Por tanto, la Hidrología comprende dos ramas:

- 1) Hidrología de superficie
- 2) Hidrología subterránea.

La Hidrología subterránea o Hidrogeología puede definirse como “el estudio geológico de las aguas subterráneas”, o bien, “aquella parte de la Hidrología que estudia el almacenamiento, circulación y distribución de las aguas subterráneas en el interior de las formaciones geológicas, teniendo en cuenta sus propiedades físicas y químicas, sus interacciones, sus reacciones a la acción antrópica, etc”.

El estudio de las leyes relativas a la existencia y movimiento de las aguas subterráneas, presupone un estudio de la geología general lo suficientemente adecuado que permita comprender los factores hidrológicos y geológicos condicionantes.

El alcance de esta ciencia, abarca entre lo que es la ciencia en sí y lo que son sus aplicaciones prácticas a los problemas relacionados con el agua en la ingeniería, agricultura, captaciones, abastecimientos, salud pública, medio ambiente, etc...

La Hidrogeología moderna se ocupa, entre otras, de las siguientes cuestiones:

- 1.- Investigación de las relaciones existentes entre las formaciones geológicas y las aguas subterráneas.
- 2.- Desarrollo de las ecuaciones matemáticas que rigen el movimiento del agua en el interior de las rocas y en las captaciones (Hidráulica subterránea).
- 3.- Estudio de la composición química del agua subterránea (Hidrogeoquímica)
- 4.-Prospección de las aguas subterráneas: Técnicas de localización y reconocimiento.
- 5.-Explotación y gestión de las aguas subterráneas dentro del conjunto de los recursos hidrológicos disponibles. Comprende las secciones de:
 - a) Proyecto y construcción de captaciones de aguas subterráneas
 - b) Recarga artificial de acuíferos subterráneos
 - c) Planificación hidráulica
 - d) Legislación de aguas
 - e) Evaluación global de las aguas subterráneas.

Aunque en muchos aspectos la Hidrogeología tiene únicamente un enfoque puramente científico, no hay que olvidar que se trata de una rama de las Ciencias de la Tierra que se ha desarrollado en su mayor parte bajo el impulso de una serie de necesidades de orden práctico. Este sentido eminentemente práctico de la Hidrogeología, irá seguramente aumentando a medida que las demandas de agua vayan

siendo mayores como consecuencia del aumento de la población, de la creciente industrialización y la puesta en regadíos de extensas zonas agrícolas.

1.2. Distribución del agua en la Tierra

El agua subterránea constituye la mayor fuente de agua potable de más fácil aprovechamiento en la actualidad, tal y como se deduce del siguiente cuadro de distribución del agua en el mundo:

	Porcentaje del agua total
Océanos	97,20 %
Casquetes polares y glaciares	2,15%
Aguas subterráneas	0,60%
Aguas superficiales (ríos, lagos)	0,04%
Atmósfera	0,001%
Seres vivos	resto

La desalinización del agua del mar por los diversos métodos hoy día conocidos constituirá en el futuro una fuente de agua potable adecuada, aunque todavía sus costes son excesivos en comparación de los que resultan del aprovechamiento de las aguas subterráneas y superficiales.

1.3. Importancia del agua subterránea

En la actualidad, las cuatro quintas partes del agua consumida proviene de los ríos y lagos. Aún así, la importancia económica que supone el aprovechamiento del agua subterránea en el mundo es enorme, pues el agua subterránea es preferida generalmente al agua superficial por las siguientes razones:

1. El agua subterránea no posee organismos patógenos y por ello no necesita ser tratada previamente, con el consiguiente menor coste al no pasar por depuradoras.
2. Su temperatura es constante, lo cual es una gran ventaja si se ha de utilizar para intercambios térmicos o como termorregulador.
3. No posee ni turbidez ni color.
4. Su composición química es generalmente constante.
5. Los volúmenes de agua subterránea almacenada son por lo general mayores que los volúmenes almacenados en superficie, por lo que el abastecimiento a partir de aguas subterráneas no suele verse afectado por las sequías prolongadas.
6. La contaminación de la mayor parte de las aguas subterráneas es difícil, por actuar de filtro las mismas rocas del subsuelo.
7. El agua subterránea, acumulada durante largas series de años de recarga, constituye el único recurso en muchas regiones donde no es posible asegurar su abastecimiento a partir de la explotación de las aguas superficiales.

Dos grandes inconvenientes suelen impedir la utilización más intensiva de las aguas subterráneas:

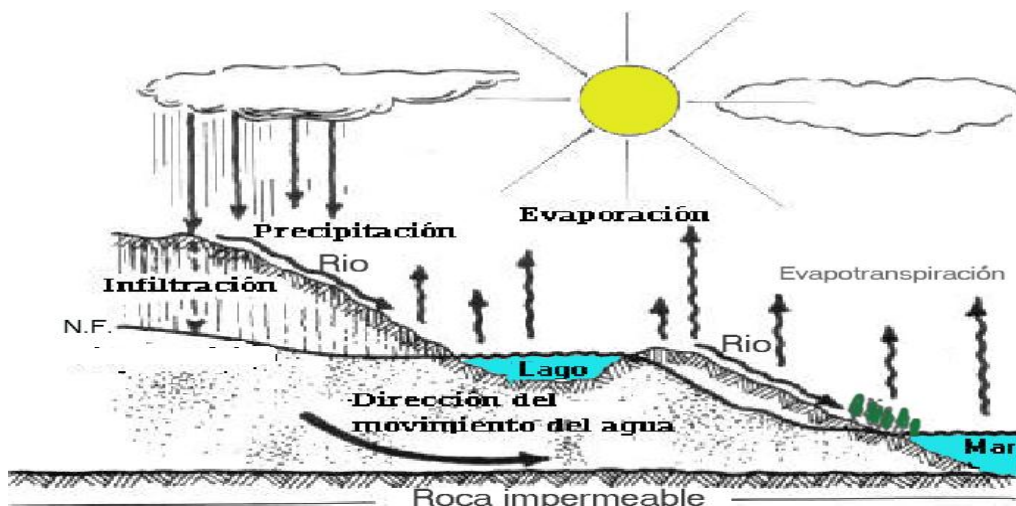
- 1) El hecho de que muchas regiones están emplazadas sobre un subsuelo rocoso cuya porosidad o permeabilidad son insuficientes para proporcionar grandes caudales de agua en las captaciones.
- 2) El coste de explotación mediante pozos de bombeo es generalmente mayor que el coste de explotación de las aguas superficiales de los ríos próximos a las zonas de consumo; sobre todo en regiones de pluviometría elevada o moderada.

1.4. El ciclo hidrológico global

Todas las aguas circulantes de la Tierra se encuentran interrelacionadas en un sistema complejo que es conocido con el nombre de ciclo del agua o “ciclo hidrológico”. Las aguas subterráneas no representan mas que una parte del ciclo total del agua, pero aún así en Hidrogeología se deben tener presentes todos los demás aspectos del ciclo hidrológico.

Los océanos son los inmensos depósitos de los cuales procede toda el agua del ciclo hidrológico y a los cuales retorna, aunque bien es verdad que no todas las partículas de agua recorren el ciclo hidrológico de una manera completa; por ejemplo, el agua que se evapora sobre la superficie de la tierra y vuelve a la tierra en forma de lluvia, nieve o granizo. En el caso más completo, el agua se evapora desde el océano, forma las nubes, las cuales son trasportadas por el viento hacia los continentes donde se condensan y caen en forma de precipitaciones, las cuales a su vez son conducidas por medio de los ríos y del flujo subterráneo hasta el océano.

La energía solar es la que mantiene el ciclo hidrológico en marcha.



1.5. Balance hidrológico:

Todo fenómeno cíclico implica una igualdad de pérdidas y de ganancias, de entradas y de salidas en el sistema, por lo que el balance del agua podrá representarse por la siguiente igualdad:

$$P = Ev + R + I$$

P = Totalidad de las precipitaciones

Ev = Evapotranspiración

R = Escorrentía superficial

I = Infiltración

La infiltración representa la cantidad de agua que penetra en el subsuelo, donde pasa a alimentar las aguas subterráneas. Esta infiltración puede ser directa a partir de las mismas precipitaciones o indirecta a partir de los ríos, embalses y de otras aguas superficiales. La infiltración está condicionada por:

- Tipo de rocas: Permeabilidad y estructuras de los acuíferos
- El clima: Pluviometría de la región, evaporación, etc...
- Topografía
- Vegetación
- Extensión de la cuenca receptora o de recarga

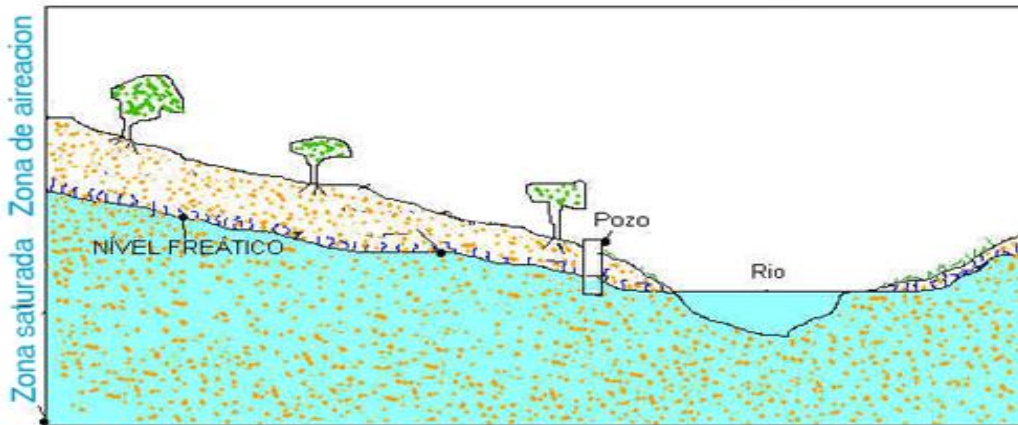
En Hidrogeología, la infiltración media interanual (recarga) es el factor mas importante del ciclo del agua y también el mas difícil de evaluar. Puede medirse por métodos directos, sumando los caudales medios anuales de las fuentes de drenaje y de las captaciones de una cuenca hidrogeológica (descarga), o bien, por métodos indirectos una vez conocidos los demás elementos hidrológicos: Precipitaciones, escorrentía y evapotranspiración.

Para que el agua se infiltre en el subsuelo es condición indispensable que las rocas sean permeables. Dentro de estas rocas el agua infiltrada alcanza grandes profundidades, dependiendo de su espesor y su estructura, constituyendo un **acuífero** o **embalse subterráneo** cuyas aguas pueden quedar retenidas, lateralmente y en profundidad, por rocas impermeables que impiden la infiltración a otros niveles más profundos o la circulación lateral a otros acuíferos.

El Nivel Freático:

El agua subterránea circula a través de las cavidades de las rocas permeables con una velocidad proporcional al tamaño de los conductos y a la presión a que se encuentre sometida, finalmente se almacena saturando todos los orificios y alcanzando un cierto nivel próximo a la superficie llamado “nivel freático”.

El nivel freático está sujeto a oscilaciones de acuerdo con la recarga del acuífero, descendiendo durante las épocas de sequía o de máximo estiaje, por efecto de la evaporación, mientras que cuando la pluviometría es abundante asciende llegando incluso hasta la superficie, originando localmente surgencias de agua que constituyen las fuentes o manantiales.



El nivel freático local se acomoda al relieve topográfico, de tal forma que no debe ser considerado como una superficie plana totalmente horizontal, situándose a mayor profundidad en las elevaciones del terreno y aflorando en los valles por donde circula el agua superficial: Por lo general, el nivel freático local coincide con el nivel del agua de los pozos, lagunas y de los ríos próximos.

1.6. Recursos y reservas hidrológicas.

Se considera como **recurso** de un acuífero al caudal medio (en litros/seg.) que sale por sus desagües naturales (manantiales) al cabo de un año. Es decir, la recarga hidrológica interanual que el acuífero saturado descarga de modo natural. Se trata de un recurso que es renovable con las precipitaciones anuales y que se puede extraer sin producir una sobreexplotación del acuífero.

Si de un acuífero se extrae una cantidad de agua igual o inferior a la recarga hidrológica, se estará explotando un *recurso*, ya que se producirá una renovación de agua en el sistema. Si el acuífero se explota a través de pozos, se observará que en estos el nivel piezométrico apenas varía con el tiempo.

En el caso contrario, si se observan descensos del nivel con el tiempo, se dirá que se está explotando una *reserva*, pues ello es indicativo de que se extrae un volumen de agua superior a la recarga, con lo cual el acuífero no puede recuperarse y acabará agotándose al cabo de un cierto tiempo (acuífero sobreexplotado).

Se llaman **reservas**, en sentido amplio, al volumen total de agua (en Hm³.) existente en un acuífero y que se puede extraer, desde uno o varios pozos, produciendo una sobreexplotación y deprimiendo el nivel freático del mismo.

La utilización de las reservas sólo se puede plantear ante una situación de extrema emergencia y la sobreexplotación ocasionada debe atajarse cuanto antes mediante la paralización de las extracciones, o bien, por recarga artificial.

2. LOS ACUÍFEROS

2.1. Definición de acuífero

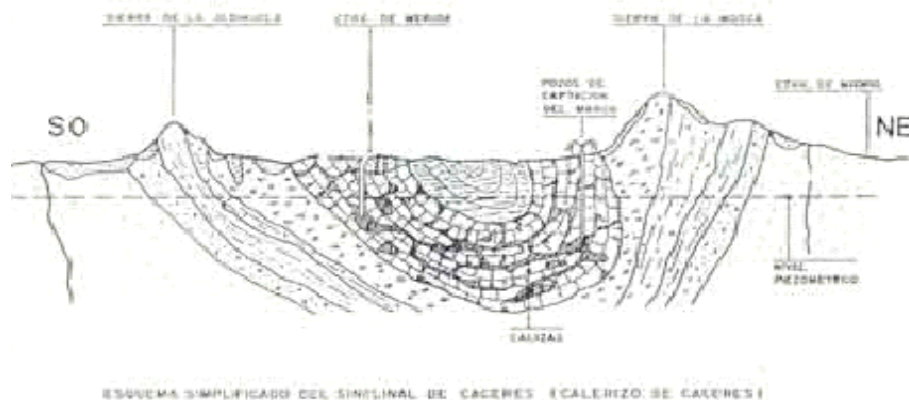
Se denomina acuífero a aquellas formaciones geológicas que almacenan y liberan agua, con la particularidad, del carácter móvil y renovable de las aguas que llegan y saturan el medio permeable, permitiendo que el hombre pueda extraerla y aprovecharla en cantidades económicamente apreciables para sus necesidades.

2.2. Cuencas hidrogeológicas

La geología interviene mediante dos factores en la presencia del agua subterránea:

- La *naturaleza* de las rocas, que determina la permeabilidad del acuífero.
- La *estructura* de los acuíferos que condiciona la circulación subterránea.

La cuenca hidrogeológica es “la unidad estructural que almacena un manto acuífero”, por consiguiente, de ella dependerá la circulación subterránea y las reservas. Ejemplo: Una cubeta sinclinal, sería el típico caso de una cuenca hidrogeológica, como El Calerizo de Cáceres.



La cuenca vertiente o cuenca hidrológica es una zona del relieve en la que las aguas superficiales circulan y se reúnen hacia un lugar común (río, lago, etc.). Está determinada por la geomorfología, es decir, por las líneas de crestas o divisorias de aguas vertientes.

La cuenca vertiente y la cuenca hidrogeológica de una región determinada no tienen que presentar necesariamente los mismos límites. Las cuencas hidrológicas subterráneas, salvo casos excepcionales, no coinciden con las cuencas hidrológicas superficiales, ya que de una manera general los accidentes topográficos no reflejan siempre la estructura del subsuelo, ni la disposición de los estratos permeables e impermeables o los accidentes tectónicos ocultos.

La circulación del agua subterránea en el interior de una cuenca hidrogeológica queda delimitada por la presencia de las rocas impermeables que constituyen el

substrato regional y por los accidentes geológicos: fallas, estratificación, etc, que condicionan la disposición y la profundidad del basamento impermeable.

2.3. Parámetros hidrogeológicos

Considerando los acuíferos como sistemas que poseen un cierto funcionamiento, regulado por la recarga y las extracciones, se comprende que deben poseer unas ciertas características fundamentales de las cuales dependen. Estas características o parámetros permiten definir el funcionamiento de un acuífero frente a unas determinadas acciones exteriores. Estos parámetros son: La **porosidad**, la **permeabilidad** y la **transmisividad**.

POROSIDAD:

La porosidad de un terreno se define como la relación (%) entre el volumen de huecos y el volumen total del terreno que los contiene: $P = V_h/V_t \times 100$

La porosidad depende de un gran número de factores entre los que cabe destacar:

- Naturaleza del terreno
- La uniformidad granulométrica de sus componentes
- La disposición y forma de las partículas
- Grado de cementación o compactación
- Efectos de la fisuración, disolución, meteorización, etc...

Los huecos o intersticios del terreno se clasifican en dos grandes grupos:

- Primarios, originados al mismo tiempo que se formaron las rocas que los contienen: Ej. Las rocas detríticas.
- Secundarios, producidos posteriormente por fracturación o por disolución: Ej. Las rocas metamórficas y las calizas.

De lo anterior se deduce que hay dos tipos de porosidades:

- Porosidad primaria u originaria
- Porosidad adquirida o secundaria, producida por fracturación o por disolución.

PERMEABILIDAD:

Es la capacidad de un terreno de permitir el paso del agua a su través. La permeabilidad es el factor más importante de las rocas en relación con la explotación de sus aguas subterráneas. Depende de:

- Tamaño de los huecos interconectados (poros, fracturas, etc.)
- La granulometría de las partículas rocosas
- Naturaleza y rugosidad de la superficie de estas partículas
- La dirección dentro del terreno (anisotropía).

Puesto que el agua subterránea es contenida y conducida por los huecos que presenta el terreno, la forma y las características de ellos influirán de un modo fundamental en el comportamiento de la permeabilidad: Los materiales granulares

bien clasificados (gravas y arenas) tienen unas elevadas porosidad y permeabilidad; en cambio, en las arcillas y los limos el agua se adosa a los diminutos poros por atracción iónica y queda retenida, es decir, son rocas muy porosas pero resultan impermeables.

CLASIFICACIÓN GEOLOGICA	Gravas Limpias	Gravas y arenas gruesas	Arenas Finas	Limos	Arcillas
CLASIFICACIÓN HIDROGEOLOGICA	Buen Acuífero		Acuífero Pobre	Acuitardo	Impermeable

TRANSMISIVIDAD:

El concepto de transmisividad se define como “el caudal que se filtra a través de una franja vertical de terreno, de ancho la unidad y de altura igual a la del manto permeable saturado de agua, bajo un gradiente hidráulico unidad y a una temperatura fija determinada”.

Si E es el espesor saturado de la formación permeable, la transmisividad es igual al producto de la permeabilidad por dicho espesor: $T = P \times E$.

Desde el punto de vista hidrogeológico, la transmisividad tiene más importancia que la permeabilidad, porque así como ésta (P) es una característica constante del terreno que deja pasar el agua, lo que no implica que la contenga, aquella (T) depende de la altura o espesor del manto acuífero saturado.

2.4. Clasificación de los acuíferos.

2.4.1. Según la presión hidrostática del agua:

- Acuíferos libres:

Son aquellos en los cuales existe una superficie libre de agua encerrada en ellos, que está en contacto directo con el aire y por lo tanto a presión atmosférica. En estos acuíferos, al realizar pozos que los atraviesen total o parcialmente, los niveles de agua de cada pozo forman una superficie freática o “nivel freático”.Ej. Las vegas de los ríos.

- Acuíferos cautivos o confinados:

Se trata de acuíferos donde el agua está sometida a una elevada presión, superior a la atmosférica y ocupa la totalidad de los poros o huecos de la formación geológica que lo contiene, saturándola totalmente. Por ello, durante la realización de pozos en estos acuíferos, se observa un ascenso rápido del nivel del agua dentro del pozo hasta estabilizarse en una determinada posición de equilibrio (“nivel piezométrico”). De acuerdo con la altura alcanzada por este nivel, los pozos pueden considerarse: surgentes o “artesianos” y no surgentes.

Los pozos surgentes son aquellos en los que el nivel piezométrico queda situado a una cota superior a la boca del pozo, y por tanto, el agua sale al exterior por si sola como un surtidor.

Los pozos no surgentes son aquellos cuyo nivel piezométrico queda por debajo de la superficie topográfica de los alrededores del pozo.

Ej. Los acuíferos localizados en fracturas o en capas permeables profundas no conectadas con la superficie.

2.4.2. Según el tipo de permeabilidad:

- Acuíferos de medios porosos:

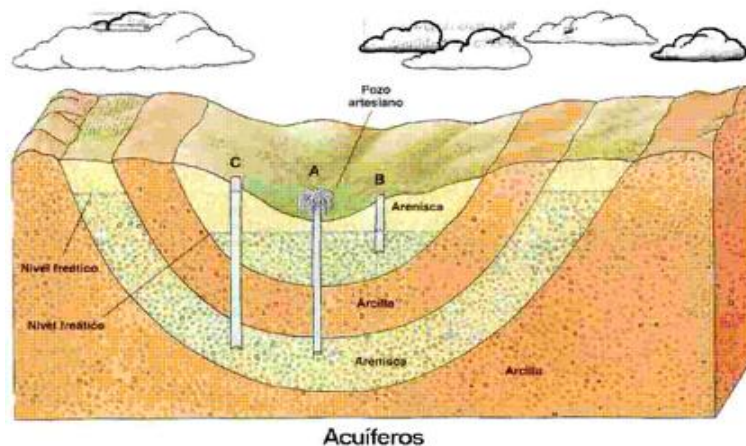
Se encuentran en los sedimentos detríticos (gravas, conglomerados, arenas y areniscas), presentan unas excelentes condiciones para almacenar y transmitir el agua, aunque las velocidades de esta son, por lo general, bajas. Ej. La cuenca del Alagón, la fosa del Tajo- Tietar, la depresión del Guadiana.

- Acuíferos de medios fisurados:

Se localizan en las fracturas de las rocas metamórficas precámbricas y paleozoicas (pizarras, esquistos, cuarcitas, etc...), las cuales han sido consideradas como impermeables, pero actualmente con el avance de las técnicas de perforación en rocas duras se ha demostrado la existencia de un complejo medio acuífero fisurado muy anisótropo. Ej. Las rocas de la penillanura extremeña.

- Acuíferos de medios kársticos:

Se trata de grandes embalses subterráneos cuyas aguas circulan y se almacenan dentro de las cavidades de las formaciones rocosas calcáreas (calizas y dolomías), las cuales tienen una porosidad secundaria originada por disolución, presentando canales y cavernas de gran tamaño que cuando se saturan de agua constituyen acuíferos muy importantes. Ej. El Calerizo de Cáceres, la Sierra de Alconera, etc.



3. HIDROGEOQUÍMICA

3.1. Relaciones entre la litología y la composición de las aguas subterráneas

El agua subterránea al circular por el interior de las formaciones rocosas va tomando sales solubles de estas.

La mayor temperatura, las elevadas presiones, el tiempo de contacto y la permeabilidad juegan además un papel esencial en el contenido salino de las aguas subterráneas.

En las rocas permeables por porosidad existe un contacto mayor entre la roca y el agua subterránea, y por lo tanto la cesión de sales es más acentuada. Sin embargo, las aguas que circulan por las rocas permeables por fracturación este contacto es menos directo y suelen tener menos sales en disolución. Las aguas más salinas son las que circulan por los macizos rocosos calcáreos, los yesos y las sales haloideas, rocas muy solubles que proporcionan una gran cantidad de iones a las aguas subterráneas.

Aunque existe una relación entre la facies geológica y la composición de las aguas subterráneas, también intervienen otros factores de origen externo como son la composición iónica del agua de lluvia, la evaporación y las precipitaciones en el suelo.

Si las aguas circulan por diferentes terrenos, su composición química en un punto determinado no solo está influida por la litología local, sino por la litología de todos los terrenos atravesados anteriormente y por los fenómenos de infiltración desde la superficie.

En general, decimos que las aguas procedentes de los terrenos kársticos son bicarbonatadas cálcicas o cálcico-magnésicas. Las de los terrenos yesosos son sulfatadas cálcicas. Las que circulan por terrenos sedimentarios de origen marino son cloruradas sódicas y las de terrenos sedimentarios de origen continental son bicarbonatadas cálcicas.

3.2. El movimiento del agua subterránea y su composición química

El agua de lluvia es la fuente primaria de la recarga hidrológica de los acuíferos. Ésta toma del suelo una determinada composición química antes de pasar a formar parte del agua de un acuífero. A partir de este momento, el agua circula por el interior del terreno, surgiendo en superficie, unas veces con un recorrido relativamente corto y otras con un recorrido de cientos de kilómetros.

El tiempo de contacto del agua con las rocas del acuífero es muy variado, tanto mayor cuanto mas elevada sea la profundidad y menor la permeabilidad. Por esta razón las aguas profundas suelen ser más salinas que las más próximas a la superficie. Las aguas que circulan próximas a la superficie apenas interaccionan con el terreno y mantienen la configuración adquirida durante la infiltración.

Las aguas subterráneas al volver a la superficie encuentran un ambiente muy diferente que puede alterar su composición, como sucede con las aguas procedentes de

ambientes reductores que pierden el hierro disuelto precipitando hidróxido férrico. El caso más llamativo de estas precipitaciones en las surgencias, es la formación de potentes espesores de tobas calcáreas (travertinos) en las zonas de descarga de los acuíferos calizos y dolomíticos. Al salir las aguas al exterior pierden CO₂ y se sobresaturan en CaCO₃, que se deposita alrededor de las plantas acuáticas originando las masas de travertinos.

3.3. Clasificación de las aguas subterráneas

Existen numerosas clasificaciones de las aguas subterráneas: Por su origen, tiempo de contacto con el acuífero, composición química, etc, que sólo dan una información general con vistas a su uso doméstico, urbano, industrial o agrícola.

- *Aguas meteóricas o recientes*: Son de origen atmosférico y tienen una composición isotópica similar a la del agua de lluvia.
- *Aguas fósiles*: Son las que han estado almacenadas durante mucho tiempo en el interior de los acuíferos cautivos. Tienen, en general, un contenido en sales muy elevado, por el largo tiempo de contacto con el terreno.
- *Aguas juveniles*: Son aquellas que proceden directamente del interior de la corteza y que no han estado antes en la superficie. Son de origen magmático y se desprenden durante las emisiones gaseosas volcánicas. Suelen tener elevadas temperaturas y por ello, contenidos anormalmente altos de S, F, Li, SiO₂ y CO₂.
- *Aguas minerales*: Son aguas de composición química muy variada, pero que se caracterizan por poseer elementos químicos en disolución en grandes cantidades. Algunas están relacionadas con los fenómenos magmáticos profundos, por lo que muchas veces son termales y por esta razón tienen gran cantidad de sales solubles.
- *Aguas saladas o salmueras*: Son de origen marino en su mayor parte, pero su larga permanencia dentro de las rocas les confiere una composición diferente a la original. Al atravesar niveles arcillosos muy potentes pierden gran cantidad de sus sales, aunque conservan todavía una elevada concentración de ellas por lo que no tienen interés para el consumo humano.

4. RELACIÓN ENTRE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES

4.1. Los manantiales:

Un manantial puede definirse como un punto de la superficie del terreno que de modo natural descarga a la superficie una cantidad determinada de agua, procedente de un acuífero o embalse subterráneo. La descarga de estos acuíferos no se efectúa únicamente mediante los manantiales sino que también puede producirse mediante evaporación al estar en contacto la zona saturada con la superficie del terreno. En ocasiones, la descarga del embalse subterráneo se realiza mediante la evapotranspiración de las plantas cuyas raíces alcanzan la zona saturada.

Los términos fuente y manantial son sinónimos, si bien el primero puede referirse también a las captaciones subterráneas y el uso del segundo se reduce exclusivamente a las surgencias naturales.

4.2. Clasificación de los manantiales:

Existen numerosos tipos de clasificaciones según el aspecto que sea considerado: El tipo de materiales geológicos que constituyen el acuífero, la estructura del terreno, el régimen del caudal o según la composición química y la temperatura de sus aguas.

- *Manantiales de ladera*: Se producen en el punto donde la superficie inclinada del terreno intercepta o corta una capa permeable. Suelen encontrarse en las proximidades de la zona de contacto entre las formaciones permeables e impermeables. Estos manantiales no proporcionan grandes caudales, dado el reducido tamaño del embalse subterráneo que drenan.

- *Manantiales de valle*: Se producen en las depresiones o en los valles en los que el límite superior de la zona saturada (nivel freático) alcanza la superficie topográfica.

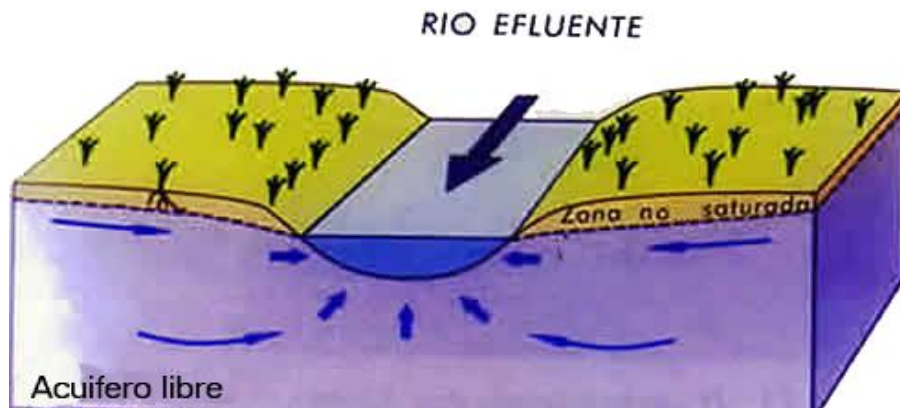
- *Manantiales intermitentes*: Son aquellos en los que su caudal pasa de ser muy escaso o nulo a ser muy importante durante breve tiempo, debido a que la descarga se hace a través de un sifón. Estos manantiales son exclusivos de las formaciones calcáreas carstificadas.

- *Manantiales de fractura*: En las rocas ígneas y metamórficas la circulación y el almacenamiento de agua se hace fundamentalmente a través de las zonas fracturadas (fallas y diaclasas). Por lo general estos manantiales son de pequeño caudal y se extinguen en verano cuando se descarga el agua almacenada a lo largo del plano de fractura.

4.3. Relaciones entre las escorrentías superficial y subterránea.

El agua de los manantiales va a parar, directa o indirectamente, a un curso superficial. Los caudales que los ríos llevan proceden en gran medida de la escorrentía de las aguas de lluvia y del deshielo de la nieve, pero también incluyen las aguas que han circulado por el interior de las rocas del subsuelo sin llegar a alcanzar la zona saturada de los acuíferos subterráneos.

Para estudiar la aportación de agua subterránea que puede realizar un acuífero a un río, o al contrario, la recarga que un embalse subterráneo puede recibir de un curso de agua superficial, es fundamental conocer el tipo de conexión hidráulica que hay entre ambos. Este vendrá dado principalmente por dos factores:



- a) Situación próxima de las formaciones geológicas permeables en relación con el cauce del río.



- b) Situación del nivel del agua del río y del nivel freático profundo en la zona del acuífero contigua al río.

En la figura a) se representa el caso de un río *drenante* o *efluente* que recoge las aguas de las grandes llanuras aluviales en las zonas con pluviometría abundante o con recarga debida a la infiltración de los excedentes del regadío. Ej. El río Tietar, el Guadiana, etc.

En la figura b) se esquematiza el caso de un río *infiltrante* o *influyente* que, no sólo no recibe ninguna escorrentía subterránea sino que pierde por infiltración parte de su caudal, debido a que el nivel del agua en el cauce es más alto que la superficie saturada de los materiales permeables contiguos. Este esquema es típico de las zonas áridas o semiáridas en las que la infiltración de agua a través de los cauces de los ríos constituye la principal fuente de recarga de los acuíferos. Ej. El río Nilo a su paso por el desierto de arenas permeables.

4.4. Modificaciones introducidas por la acción del hombre.

Los **embalses** suponen una variación en el régimen natural de los caudales de un río, quedando algunos tramos fluviales totalmente secos aguas abajo del embalse. Esta disminución en los niveles de agua del río conduce a que la recarga producida en los acuíferos conectados hidráulicamente al río pueda verse sensiblemente afectada. Este efecto puede ser especialmente importante en aquellos acuíferos de países áridos cuya recarga se debe fundamentalmente a la infiltración de las aguas del río en los periodos de crecida.

La creación de embalses produce también una elevación de la superficie freática en el área más próxima que puede tener importantes consecuencias agrícolas, haciendo el terreno demasiado húmedo para algunos cultivos o incluso anegándolo; en algunos casos, es posible que se mejoren las condiciones de áreas que inicialmente eran demasiado secas.

Por último, cabe decir que la influencia de la variación de niveles de las aguas en los embalses puede alcanzar grandes distancias, produciendo cambios en los niveles de los pozos y de las fuentes situadas a varios kilómetros del embalse.

Cuando los ríos son infiltrantes, es decir cuando la zona saturada queda por debajo de su cauce, la derivación de las aguas reguladas del río mediante **canales** o tuberías, suele dar lugar a una disminución de la recarga natural de los embalses subterráneos. Es decir, la construcción de canales también puede tener efectos análogos a los embalses, cuando están sobre terrenos permeables y sus aguas no se filtran por estar revestidos.

Por el contrario, cuando la superficie del agua del canal queda más baja que la superficie del nivel freático, actúan a modo de drenes y hacen descender la zona saturada, dejando en seco algunos pozos o perjudicando a determinados cultivos.

En algunos lugares donde la recarga hidrológica es escasa, debido a las fuertes pendientes o a la baja permeabilidad del terreno, se ha propuesto aumentar los recursos de los acuíferos mediante la construcción de pequeñas presas de tierra que ayuden a la infiltración.

5. PROSPECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

5.1. Métodos de prospección de aguas subterráneas.

Entendemos por prospección de aguas subterráneas el conjunto de trabajos de investigación que permiten la localización de acuíferos o embalses subterráneos de los que se puede obtener agua en cantidad y calidad adecuada para un determinado fin.

5.1.1. Métodos geológicos:

Antes del comienzo de los trabajos de campo, el hidrogeólogo debe consultar la cartografía geológica de la zona donde se indica la naturaleza litológica de los diferentes afloramientos rocosos así como sus características estratigráficas y estructurales.

La interpretación del mapa geológico se basará fundamentalmente en la identificación de las formaciones rocosas permeables y de las impermeables, sus límites, las principales unidades hidrogeológicas, fracturas principales, zonas de recarga y descarga hidrológica, etc...

La realización de perfiles y cortes geológicos son muy útiles para adquirir una visión adecuada de la geometría de los acuíferos, su espesor y situación del nivel piezométrico.

El estudio de las fotografías aéreas constituye también un excelente instrumento para la cartografía geológica porque pone de relieve aspectos difíciles de ver sobre el propio terreno: Grandes fracturas, zonas de drenaje, la red fluvial, etc.

5.1.2. Métodos geofísicos:

La aplicación de la prospección geofísica nos ayuda a conocer la distribución de los materiales en el subsuelo así como su naturaleza, analizando la variación de las propiedades físicas de las rocas con la profundidad. Los métodos de prospección geofísica que se aplican en hidrogeología servirán siempre de apoyo y colaboración a los estudios geológicos previos, para determinar la existencia y distribución aproximada del agua en los terrenos permeables.

Los métodos geofísicos más efectivos en la prospección de las aguas subterráneas son:

El método eléctrico, que mide la variación de la resistividad de las diferentes rocas con la profundidad. Cuando las rocas son muy resistivas carecen de poros o fisuras que puedan estar saturados en agua. Sin embargo, cuando existen aguas subterráneas acumuladas en los huecos de las rocas, la resistividad será mucho más baja, debido a que el agua, por la presencia de sales disueltas en ella, actúa como un conductor.

Es decir, a efectos hidrogeológicos, una baja o nula porosidad de las rocas se manifiesta por una elevada resistividad. Así mismo, si la roca se encuentra sobre

el nivel freático, o no contiene agua, su resistividad será también elevada. Pero si la resistividad es muy baja, el agua almacenada tendrá un elevado contenido en sales, o las rocas son arcillosas e impermeables.

El método gravimétrico, estudia las anomalías de la gravedad en la superficie terrestre a fin de deducir zonas muy compactas e impermeables, con anomalías positivas, y zonas porosas o fracturadas permeables con anomalías negativas por defecto de masa.. Es útil para determinar la existencia de fallas importantes o de grandes cavidades kársticas saturadas de agua.

El método electromagnético, estudia la influencia del terreno sobre un campo electromagnético artificial. Puede aplicarse desde aviones y recientemente, comienza a utilizarse en estudios hidrogeológicos regionales. Es un método que tiene grandes posibilidades en un futuro no muy lejano, especialmente para prospecciones donde no es necesario llegar a profundidades superiores a los veinte metros.

5.2. Prospección de las aguas subterráneas en los distintos tipos de rocas de Extremadura.

La prospección de las aguas subterráneas debe comenzar con el reconocimiento geológico de la zona, ya que la ausencia o existencia de acuíferos subterráneos está fundamentalmente condicionada por la naturaleza de las rocas que constituyen el subsuelo.

Describimos a continuación las características hidrogeológicas de las rocas más comunes de la región extremeña, separándolas en unidades de diferente comportamiento hidrogeológico.

- Rocas metamórficas:

La mayor parte de la región extremeña (60%) está constituida por pizarras, grauvacas y cuarcitas pertenecientes al Precámbrico y al Paleozoico. Rocas que a diferencia de las magmáticas (granitos), se muestran normalmente muy fracturadas hasta grandes profundidades, por lo cual son consideradas como semipermeables y llegan a proporcionar caudales de hasta diez litros/segundo.

No obstante, dentro de las rocas pizarrosas existen tipos muy variados y no todos presentan iguales características hidrogeológicas. Las pizarras arcillosas, cuyas fracturas se encuentran taponadas por productos arcillosos, resultan acuíferos pobres con poca o nula permeabilidad mientras que las pizarras areniscosas, las cuarcitas y las grauvacas, presentan fracturas limpias que pueden proporcionar caudales de medio litro a dos litros por segundo cada una. Por tanto, el éxito de una perforación en estas rocas, está condicionado al número de fracturas abiertas que puedan cortarse y a las conexiones de éstas con otras fracturas extendidas en una amplia zona de recarga. Se abastecen de estas aguas las poblaciones de los municipios de Plasenzuela, Botija, Monroy, Torrequemada, Torreorgaz, etc, en la penillanura trujillano-cacereña.

Las captaciones deben realizarse con máquina perforadora que trabaje a rotoperCUSión neumática y con circulación directa de lodos, entubando con PVC de cuatro atmósferas y engravillando con gravas tipo “garbancillo”. En algunas fuentes de ladera pueden realizarse captaciones superficiales mediante zanjas colectoras tipo “pata gallina”, rellenándolas con gravas gruesas que faciliten el drenaje hacia un punto determinado.

- Rocas graníticas:

Aproximadamente una quinta parte de los terrenos extremeños están formados por rocas cristalinas: granitos, granodioritas, dioritas, gabros, etc. En su conjunto estas rocas son muy impermeables y no tienen capacidad para almacenar aguas subterráneas porque carecen de porosidad primaria.

Sin embargo, algunas captaciones construidas en estas rocas suministran caudales medios reducidos (0,5 l/seg.). El agua procede principalmente de las zonas superficiales arenizadas (jabre), o bien de fracturas más profundas. Tanto la meteorización como la densidad de fracturación son más intensas cerca de la superficie y decrecen progresivamente al aumentar la profundidad, con lo cual no por mucho profundizar en estas rocas obtendremos más agua.

En casos excepcionales se han cortado grandes fallas con amplias zonas de rocas trituradas que suministran un caudal elevado, pero con el transcurso del tiempo el acuífero puede sufrir un brusco descenso cuando se agotan sus reservas acumuladas a lo largo del plano de fractura. Es decir, estas rocas sólo desarrollan acuíferos de poca entidad en las zonas superficiales alteradas (3-10 m.) y acuíferos de mayor envergadura en las zonas de grandes fracturas.

Las captaciones en zonas arenizadas se construirán en vaguadas, mediante zanjas colectoras de unos 2-4 m. de profundidad, realizadas con máquinas retroexcavadoras y rellenas de gravas. Las captaciones en zonas fracturadas se realizan mediante perforaciones profundas con máquinas que trabajan a rotoperCUSión neumática y circulación directa de lodos.

Lógicamente los puntos más adecuados para las perforaciones serán los situados en la confluencia de varias fracturas, donde se suelen obtener caudales extraordinarios de hasta 5 l/seg. Es el caso de los pueblos de Ruanes, Santa Ana, Montánchez, Conquista de la Sierra, Santa Cruz de la Sierra, Berrocalejo...etc.

- Rocas filonianas:

Son muy comunes en Extremadura, sus yacimientos se presentan de forma alargada y con poco espesor, formando diques o filones emplazados dentro de las rocas graníticas y pizarrosas de nuestra región. Los tipos más frecuentes son los filones de cuarzo, lamprófidos y diabasas, los cuales actúan, si están muy fracturados, como capas drenantes respecto a las rocas encajantes de menor permeabilidad; otros no fracturados son impermeables y actúan de “presa hidrogeológica” reteniendo las aguas subterráneas.

Pueden suministrar caudales elevados, de uno a cinco litros/segundo, proporcionales a la anchura, extensión y grado de fracturación que presenten.

Las captaciones deben realizarse con máquina perforadora de rotoperusión neumática y circulación directa, sondeando sobre el recorrido del dique o bien en sus laterales si éste fuera impermeable y actuara de presa hidrogeológica. De este modo se han abastecido las poblaciones cacereñas de Villa del Rey, Ruanes y Torrejoncillo en diques de diabasas.

- Rocas calcáreas:

Se trata de calizas y dolomías que son relativamente abundantes en la provincia de Badajoz (1,6 %), mientras que en la de Cáceres sólo existen pequeños afloramientos. Estas rocas tienen una alta permeabilidad y constituyen excelentes acuíferos ya que son rocas solubles que presentan en profundidad grandes conductos de disolución, canales y cavernas, que actúan como embalses subterráneos y que llegan a proporcionar caudales muy elevados, superiores a los diez litros/segundo. Es el caso del acuífero kárstico de El Calerizo (Cáceres) donde se obtienen caudales de hasta 90 l/seg. y el de Casas de Reina, que abastecía la antigua ciudad romana de Regina, Los Santos de Maimona, Fuente del Maestre, Alconera, Valverde de Leganés y Fregenal de la Sierra entre otros.

Son aconsejables las captaciones realizadas a percusión, con martillo en fondo, en las zonas más carstificadas donde pueden existir pérdidas de aire cuando se utiliza la rotoperusión neumática. Este último método es también bastante eficaz en zonas compactas y poco carstificadas.

- Rocas sedimentarias consolidadas:

Son todas aquellas rocas detríticas de origen continental, sedimentos de la era terciaria de facies lacustre, que rellenan en nuestra región las depresiones y fosas tectónicas originadas sobre el basamento granítico-pizarroso: Fosa del Tajo-Tietar, cuenca del Guadiana, fosa del Alagón...etc.

Se trata de formaciones horizontales muy heterogéneas (“acuíferos multicapas”) que resultan permeables por porosidad primaria. Por tanto, los caudales que suministran, generalmente elevados, son proporcionales al volumen de los orificios saturados de agua que contengan y al tamaño de los estratos permeables.

Los materiales de relleno de la fosa del Tajo-Tietar y del Alagón son predominantemente arenosos, se trata de sedimentos arcósicos procedentes de la erosión de los granitos de Gredos. Sin embargo, los del Guadiana son eminentemente arcillosos, producto de la meteorización de los relieves pizarrosos circundantes.

En consecuencia, los materiales arenosos de las cuencas del Tajo y del Alagón constituyen buenos acuíferos, obteniéndose caudales medios de 15 l/sg. a profundidades de unos 200 m., como ocurre en los municipios de Casillas de Coria, Carcaboso, Alagón, Morcillo, Galisteo y Peraleda de la Mata. Todas estas

captaciones se han realizado de manera eficaz con máquinas perforadoras que trabajan a rotación con circulación inversa de lodos y entubando los pozos con tubos de hierro y filtros “de puentecillo” para evitar la entrada de finos.

Los materiales terciarios de la cuenca del Guadiana no alcanzan grandes espesores (inferiores a los 80 m.) y existen varios niveles acuíferos entre arcillas, formados por intercalaciones de capas de arenas y gravas, con caudales de pequeña envergadura inferiores a los 3 l/sg. En la zona superior de estos materiales se encuentran “caleños” de origen lacustre que pueden llegar hasta los 15 m. de espesor, desarrollando acuíferos cársticos cuyas captaciones proporcionan caudales del orden de los 3 l/seg., son los casos de Torremegía y Ahillones entre otros.

- Rocas sedimentarias no consolidadas:

Las gravas y arenas sin compactar que se encuentran a lo largo y ancho de las vegas de inundación de los ríos extremeños, son sedimentos muy permeables y su sistema hidrológico está íntimamente relacionado con el del cauce fluvial que los origina. Casi sin excepción, será posible obtener caudales del orden de cinco a diez litros/segundo en casi todos los aluviones de los ríos permanentes extremeños, con una zona saturada de agua de uno a diez metros de profundidad.

Algunas poblaciones próximas a ellos se abastecen de estos acuíferos, mediante pozos de drenes radiales, “tipo Fehlmann,” que pueden proporcionar caudales de hasta cien litros/segundo. Es el caso de Navalmoral de la Mata y Mérida, que se abastecen de los aluviones de los ríos Tietar y Guadiana respectivamente, aunque la calidad de sus aguas es muy deficiente debido a su conexión directa con las contaminadas aguas superficiales de estos dos ríos.

6. EXPLOTACION DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS

6.1. Captaciones de aguas subterráneas

Actualmente cuando hablamos de captaciones para la explotación de aguas subterráneas, se suele entender implícitamente que se trata de pozos perforados verticales, en especial de pequeño diámetro (150-200mm.). Sin embargo hay otros muchos sistemas constructivos que permiten el mismo propósito tales como los pozos excavados o de gran diámetro, los pozos de drenes radiales, las zanjas de drenaje y las galerías filtrantes o “minas de agua”.

- Perforaciones verticales o pozos de pequeño diámetro:

Entendemos por pozos verticales todas aquellas captaciones que se proyectan para obtener agua mediante bombeo del subsuelo y se construyen por penetración vertical de la obra en un manto acuífero.

Para proyectar un pozo vertical de pequeño diámetro, es necesario considerar los siguientes parámetros: Profundidad del pozo, método de perforación, entubación, diámetro del pozo, engravillado, desarrollo, protección sanitaria y criterios de control y vigilancia.

La *profundidad del pozo* vendrá definida fundamentalmente por las características de la formación geológica permeable a explotar. Si se trata de un acuífero libre se deberá considerar el interés de alcanzar su zócalo impermeable. Si se trata de un acuífero cautivo se aconseja su perforación completa hasta alcanzar otros niveles impermeables, o incluso sobrepasarlos para captar nuevos acuíferos confinados y sumar sus caudales.

Los *métodos de perforación* de pozos construidos mediante el uso de máquinas perforadoras son los siguientes: Perforación a percusión, perforación a rotación con circulación directa, perforación a rotopercusión neumática y perforación a rotación con circulación inversa.

El *diámetro de perforación del pozo* será el mismo desde la superficie del terreno hasta la profundidad a la cual se tendrá que colocar la bomba. Este diámetro deberá permitir el paso de la bomba con el espacio recomendable que vendrá condicionado por sus características de fabricación. El diámetro de la tubería de revestimiento condicionará el diámetro aconsejable en la perforación del pozo. En rocas compactas se suele perforar a 200 mm. de diámetro y colocar un entubado de PVC de 180 mm. de diámetro. En materiales poco coherentes (arenas, gravas, etc.) se perfora a 300- 500 mm. de diámetro, entubándose con rejillas de hierro de 250-450 mm. de diámetro.

La *entubación* de un pozo después de perforado se realizará de acuerdo con la naturaleza de los terrenos atravesados. El entubado debe aguantar la presión de las paredes verticales del pozo y servir de conductor para el agua que se extraerá con la bomba de su interior. Para evitar que las aguas superficiales puedan contaminar las profundas los primeros metros del entubado (emboquille) deben ser ciegos,

mientras que la tubería filtrante (con orificios) debe disponerse justo enfrente de las capas permeables que aporten agua a la captación.

El entubado se hace generalmente con tuberías metálicas aunque actualmente se está generalizando la tubería de PVC de resistencia superior a cuatro atmósferas. Cuando los terrenos son arenosos el entubado de las capas drenantes deberá realizarse con tubería “de puentecillo” para evitar la entrada de finos que puedan estropear las bombas y anegar el pozo.

El *engravillado* es necesario cuando se trata de acuíferos en arenas finas y uniformes o en materiales incoherentes. En estos acuíferos no es suficiente la colocación de una rejilla o tubería de puentecillo para el correcto funcionamiento del pozo, sino que se hace necesario también colocar un relleno de gravas, “tipo garbancillo”, en el espacio anular que queda entre la pared del terreno perforado y la tubería de revestimiento.

El *desarrollo* del pozo tiene como misión principal limpiar las grietas y los orificios drenantes de las rocas, de los residuos y lodos de la perforación, para obtener el mejor caudal específico posible y se favorece su vida útil. Los métodos que se utilizan son: Sobrebombeo, lavado a contracorriente, aire comprimido, pistoneo, acidificación, fracturación hidráulica, nieve carbónica y utilización de explosivos.

La *protección sanitaria*, junto con los criterios de control y vigilancia, se aplicará posteriormente por el usuario una vez que el pozo haya sido finalizado y comience su explotación racional para un determinado suministro. Si el agua se emplea para el abastecimiento humano es muy recomendable la creación de un *perímetro de protección* sanitaria en la zona superficial influenciada por los bombeos, que podría extenderse a toda la zona de recarga o de alimentación del acuífero, evitando los sobrebombeos y prohibiendo los vertidos incontrolados de productos tóxicos, las basuras, las fosas sépticas y otros focos contaminantes.

- Pozos excavados o de gran diámetro:

Son los pozos tradicionales, realizados manualmente “a pico y pala” o con máquinas retroexcavadoras, martillos neumáticos y explosivos. Por lo general tienen diámetros entre 1,5 y 5 metros y están revestidos de tubos o bloques de hormigón prefabricados, piedras, ladrillos, etc. Su profundidad es moderada y no excede a la del manto acuífero subsuperficial, por lo que sólo se utilizan para explotar acuíferos libres de poco espesor, localizados en terrenos poco consolidados (arenas, gravas, etc.) o en rocas fisuradas y/o meteorizadas superficialmente (pizarras, granitos, etc.).

- Pozos de drenes radiales:

Se les conoce con diversos nombres, tales como pozos de drenes horizontales, pozos radiales, pozos horizontales y pozos colectores. En cualquier caso corresponden siempre a un mismo tipo funcional en el que se distinguen dos partes: Un pozo vertical de gran diámetro y un conjunto de drenes o perforaciones horizontales que salen de su fondo en el que desaguan a través de válvulas de

compuerta. Los dos sistemas de construcción más utilizados son el *tipo Ranney* y el *tipo Fehlmann*, en acuíferos libres de materiales detríticos conectados con las aguas subálveas de los ríos.

-Zanjas de drenaje:

Cuando el nivel freático es poco profundo y los materiales están meteorizados y/o no consolidados, la captación del agua se puede hacer mediante zanjas colectoras que llegan al nivel de saturación. Se realizan con máquinas retroexcavadoras hasta profundidades de 3-10 metros y se rellenan de gravas a través de las cuales se puede evacuar el agua por gravedad dándole al fondo una pequeña inclinación. Es frecuente que en la zanja se instale también una tubería filtrante con orificios apropiados al material granular que la rodea.

- Galerías filtrantes o minas de agua:

Se realizan en regiones montañosas hasta alcanzar la zona de saturación y con una cierta pendiente del suelo para evacuar el agua al exterior por gravedad. Sus dimensiones serán suficientes para que se pueda entrar y trabajar sin dificultades en su realización y en su mantenimiento posterior.

6.2. Pruebas de bombeo: Aforos.

Una vez que ha sido finalizada una captación, resulta muy fácil realizar una prueba de bombeo y conseguir un aforo aproximado de su caudal manteniendo durante 72 horas la posición del nivel piezométrico estabilizada.

La determinación del caudal de un pozo nos dará la información que necesitamos para seleccionar el tipo de bomba, para conocer el suministro de agua disponible y para calcular los costes de mantenimiento del bombeo.

Los caudales de las aguas subterráneas se miden en litros/segundo. Se dice que una captación produce 1 l/seg. cuando es capaz de suministrarlo ininterrumpidamente las 24 horas al día sin provocar un descenso acusado del nivel piezométrico local. Con él se puede abastecer una población de unos 300 habitantes, regar por goteo unas 4 Ha., o dar de beber al equivalente de 3000 cabezas de ganado ovino.

7. PROBLEMAS MEDIOAMBIENTALES DERIVADOS DE LA EXPLOTACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

7.1. La sobreexplotación de los acuíferos

El sistema de explotación más eficaz de un acuífero, para aprovechar al máximo sus recursos y no incurrir en sobreexplotación, es el de extraer anualmente una cantidad de agua igual o inferior a la de la recarga media interanual.

La sobreexplotación consiste en extraer más agua de la que entra en el sistema acuífero, lo que supone un consumo de las *reservas* que se refleja en el descenso del nivel freático o piezométrico, hasta el punto que se secan los manantiales y disminuye el caudal de los ríos, creándose graves problemas de suministro. Si la sobreexplotación tiene lugar en los acuíferos de la costa conectados con las aguas marinas, el agua dulce se extrae en su totalidad y deja paso al agua salada del mar que invade el medio permeable terrestre según un proceso conocido con el nombre de “intrusión marina” que saliniza el agua subterránea de los pozos.

Se diferencian tres tipos de sobreexplotación:

- La explotación de los recursos anuales de una sola vez a un fuerte ritmo hasta estabilizar el bombeo en un determinado valor.
- Sobreexplotación no destructiva que es la producida cuando se llega más allá de los límites antes mencionados durante poco tiempo.
- Sobreexplotación destructiva a la cual se conduce el acuífero cuando se prolongan las extracciones excesivas durante mucho tiempo, que lo hacen prácticamente inexplorable, bien por la degradación de la calidad química de sus aguas, o bien, por motivos económicos derivados de la elevación desde una gran profundidad de las aguas subterráneas.

7.2. Consecuencias de la sobreexplotación:

La sobreexplotación conduce a un continuado consumo de las *reservas* y a un descenso no estabilizado de los niveles piezométricos. Si consideramos el acuífero como un sistema regulador de entradas y salidas de agua, una disminución de las reservas hará que disminuyan las garantías de suministro ante situaciones extraordinarias, como puede ser una sequía prolongada, y puede favorecer además la intrusión de aguas de calidad no deseable.

El efecto más directo de la sobreexplotación es el empeoramiento de la calidad química de las aguas subterráneas, a causa de los siguientes factores:

- Menos disolución de las aguas antiguas almacenadas en el acuífero con las nuevas de la recarga anual, lo que favorece la concentración de sales.
- Salinización de los pozos por el avance de las aguas marinas tierra adentro al alterarse del equilibrio agua dulce-agua salada.

- Recarga inducida de las aguas contaminadas de los ríos a los acuíferos, ya que los ríos pasan de ser efluentes a ser influyentes.
- Recarga inducida de las aguas contaminadas por lixiviación de los focos contaminantes situados sobre el acuífero.

También pueden producirse los siguientes riesgos geofísicos:

- La sobreexplotación de algunos acuíferos puede inducir a la subsidencia del terreno al disminuir la presión efectiva que ejercen las aguas subterráneas, produciéndose asientos y colapsos de suelos.
- El abandono del bombeo en un acuífero sobreexplotado puede provocar una subida rápida del nivel freático, inundando aquellas edificaciones que habían sido construidas cuando los niveles estaban más bajos.

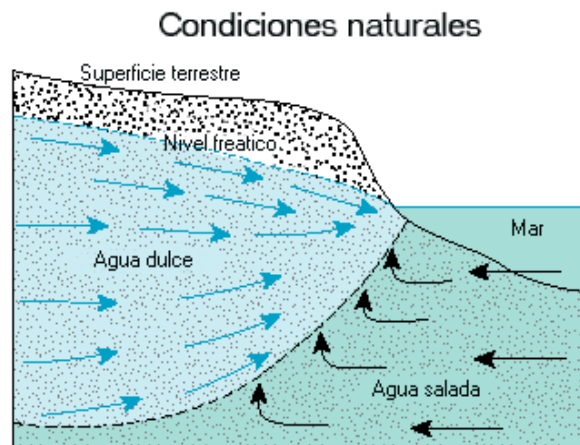
7.3. Medidas correctoras de la sobreexplotación:

La sobreexplotación ocasionada debe atajarse lo antes posible hasta conseguir la recuperación de los niveles freáticos, mediante:

- Prohibición de construir nuevos pozos
- Detener los sobrebombes
- Ausencia de extracciones
- La recarga artificial de los acuíferos
- Ordenación y limitación por zonas

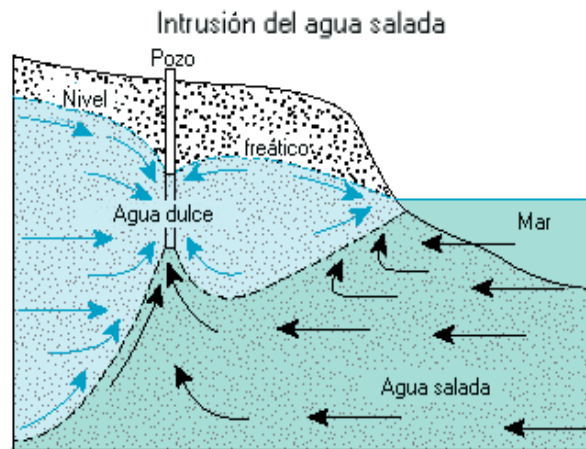
7.4. La intrusión de las aguas marinas:

Las aguas que saturan los acuíferos costeros conectados con el mar mantienen un equilibrio hidrodinámico entre el agua dulce del acuífero y el agua salada del mar, con la singularidad de que el agua marina es más densa y esto hace que tienda a desplazarse por debajo del agua dulce formando una cuña de agua marina tierra adentro.



El efecto de una extracción desmesurada de agua dulce cerca de la costa, da un carácter dinámico a la interfase agua dulce-agua salada. Así, cualquier sobreexplotación

de un acuífero costero provocará cambios en la posición de la interfase, la cual avanzará tierra adentro en forma de cuña salina: El agua dulce se extrae en su totalidad y deja paso al agua salada que invade los espacios libres de las rocas permeables salinizando el agua de los pozos. Esta intrusión marina se produce sobre todo en las zonas turísticas del litoral mediterráneo.



Los resultados negativos de las extracciones excesivas de agua dulce provocan las siguientes:

- Consecuencias relacionadas con el descenso del nivel freático: Deseccación de marismas, subsidencia y abandono de los pozos. Lo anterior puede provocar que las construcciones que se habían edificado con niveles freáticos bajos puedan ser inundadas al recuperar aquellos su nivel primitivo.
- Consecuencias relacionadas con la salinización de las aguas: Degradación de suelos agrícolas, corrosión de las conducciones de agua, impotabilidad y problemas sanitarios.
- Consecuencias relacionadas con aspectos socioeconómicos: Abandono de cultivos, traslado de industrias, necesidad de nuevas obras de abastecimiento, economía paralela de agua embotellada, etc...
- Otras consecuencias: Cambios en la fauna y en la flora de las zonas costeras.

7.5. Los procesos antrópicos de contaminación de acuíferos:

Las contaminaciones de los acuíferos raramente se producen de forma natural y espontánea, detrás siempre está la mano del hombre: Las actividades mineras y de rocas industriales, las construcciones subterráneas, los colectores de aguas residuales de las urbanizaciones, la nula protección sanitaria de las áreas de recarga, los vertidos de desechos urbanos e industriales, la inyección de líquidos nocivos al medio permeable (fosas sépticas), etc, son los principales focos contaminantes.

Por otro lado, el aumento de las extracciones por bombeo producido por el incremento de la demanda, acelera el movimiento y la difusión de los contaminantes, paralelamente a la progresiva degradación de las aguas subterráneas y superficiales.

Las contaminaciones de un acuífero subterráneo son de tres tipos según su distribución espacial:

- Contaminaciones puntuales: La mayoría están relacionadas con la eliminación de aguas residuales, los desperdicios urbanos (basureros) y los residuos industriales y mineros.
- Contaminaciones lineales: Los ríos y canales de riego con aguas contaminadas pueden pasar de efluentes a influentes por inversión causada por la sobreexplotación de los acuíferos. Este fenómeno puede considerarse generalizado en los acuíferos lineales de los aluviales conectados al río.
- Contaminaciones dispersas: Ej. Ciertas actividades agrícolas como abonar los cultivos, el empleo de productos fitosanitarios, plaguicidas, insecticidas y herbicidas.

La vulnerabilidad de los acuíferos subterráneos a la contaminación está condicionada por los siguientes factores:

- El poder filtrante de los acuíferos granulares (arenas) gracias al cual los contaminantes pueden quedar retenidos en los poros intergranulares, hecho que no sucede en los acuíferos fisurados y kársticos, donde los huecos son mucho más grandes y no tienen la capacidad de filtración de los contaminantes: Acuíferos muy vulnerables.
- El espesor de la zona saturada de la formación geológica del acuífero.
- La velocidad del flujo de las aguas subterráneas, condiciona los fenómenos de disolución y fijación de ciertos contaminantes. Esta es muy lenta en los acuíferos porosos homogéneos, pero puede ser extremadamente rápida en los acuíferos kársticos.
- La protección natural del acuífero. En acuíferos cautivos, la existencia de rocas impermeables situadas en la parte superior asegura una protección natural de las aguas subterráneas contra las contaminaciones provenientes de la superficie.

