

2. CONCEPTOS BÁSICOS DE HIDROGEOLOGÍA

2.1. Acuíferos, aguas subterráneas

2.2. Clasificación de los acuíferos

2.3. Funcionamiento de los acuíferos

2.4. Parámetros característicos de los acuíferos

2.5. Otros conceptos y definiciones

2.- CONCEPTOS BÁSICOS DE HIDROGEOLOGÍA

2.1.- ACUÍFEROS, AGUAS SUBTERRÁNEAS

Los conceptos de acuífero y de agua subterráneas pueden variar según se trate de sistemas en estado natural o de sistemas en explotación, de forma que se suele aceptar una definición más amplia en el caso de unidades no explotadas que cuando se ponen por medio intereses económicos, sin embargo la lógica parece indicar que dicha definición ha de ser independiente del uso del recurso.

Definición.

En la legislación actual¹ se define como acuífero "las formaciones geológicas por las que circulan aguas subterráneas"; aunque es una definición correcta parece algo simplista al no considerar ninguna de las propiedades o características que definen estas estructuras, pues existen formaciones por las que circula agua, pero lo hace en cantidades tan pequeñas o a velocidades tan reducidas que apenas pueden ser aprovechada.

¹ Ley 29/1985 de 2 de agosto de aguas. Capítulo IV, artículo 12. BOE 189-1985

Entre las definiciones recogidas en la bibliografía puede destacarse la siguiente²: "*Formación, grupo de formaciones o parte de una formación que está saturada y es lo suficientemente permeable para transmitir cantidades de agua económicamente rentables a manantiales o de ser captadas mediante algún sistema de explotación como galerías, zanjas, pozos, sondeos, etc.*" Esta definición contiene algunos detalles que es conveniente aclarar:

* Existen materiales, como las arcillas, que pueden contener importantes cantidades de agua pero que al encontrarse fuertemente retenidas por fuerzas capilares³ no es posible su extracción por los métodos citados anteriormente, por lo que estas formaciones no pueden ser consideradas como acuíferos (de hecho las estructuras arcillosas constituyen acuitardos⁴ que las aguas subterráneas atraviesan de forma extraordinariamente lenta).

* Considerar como acuífero únicamente formaciones "económicamente aprovechables" presenta la dificultad de decidir cuando la explotación de una unidad presenta esta característica. En la

² Guía metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas. ITGE 1991.

³ La cantidad de agua contenida en un material no es un indicador de la facilidad con la que puede ser extraída. El volumen máximo de agua contenido en un material está en función de la porosidad eficaz que en el caso de las arcillas puede alcanzar valores tan elevados como el 70%, mientras que la facilidad o dificultad para su extracción está ligada al tamaño de estos poros.

⁴ Un acuitardo es una formación muy poco permeable por la que puede circular el agua aunque a velocidades muy lentas.

cartografía hidrogeológica de nuestro país, se clasifican como zonas carentes de acuífero áreas en las que la explotación del agua supone sin embargo un capítulo importante en la economía local, aunque puedan ser poco relevantes a nivel regional.

* El agua que brota de los manantiales, aunque ya no está contenida en una estructura geológica, es agua subterránea y posee todas las características de éstas, no pudiendo diferenciarse, desde un punto de vista físico o químico, el agua que mana de la que se encontraba unos instantes antes en el acuífero, además el uso de manantiales es una forma de regular la explotación de aguas subterráneas.

Agua subterránea será pues, en un sentido muy amplio, la que se encuentra contenida en el interior de los acuíferos y la que brota de los manantiales hasta que su interacción con el medio y en especial con los materiales que la rodean y la atmósfera modifican sus características físicas, químicas o físico-químicas (pH, Eh, temperatura, composición química, gases disueltos, desarrollo de actividad biológica, etc.)

2.2.- CLASIFICACIÓN DE LOS ACUÍFEROS.

Son muchas las clasificaciones que se han hecho de los acuíferos en función de criterios diversos hidrogeológicos, económicos, geológicos, etc. pero lo que más nos interesa es el empleo de la vulnerabilidad a la contaminación microbiológica, como criterio de

diferenciación, en base a esto podemos hablar de.

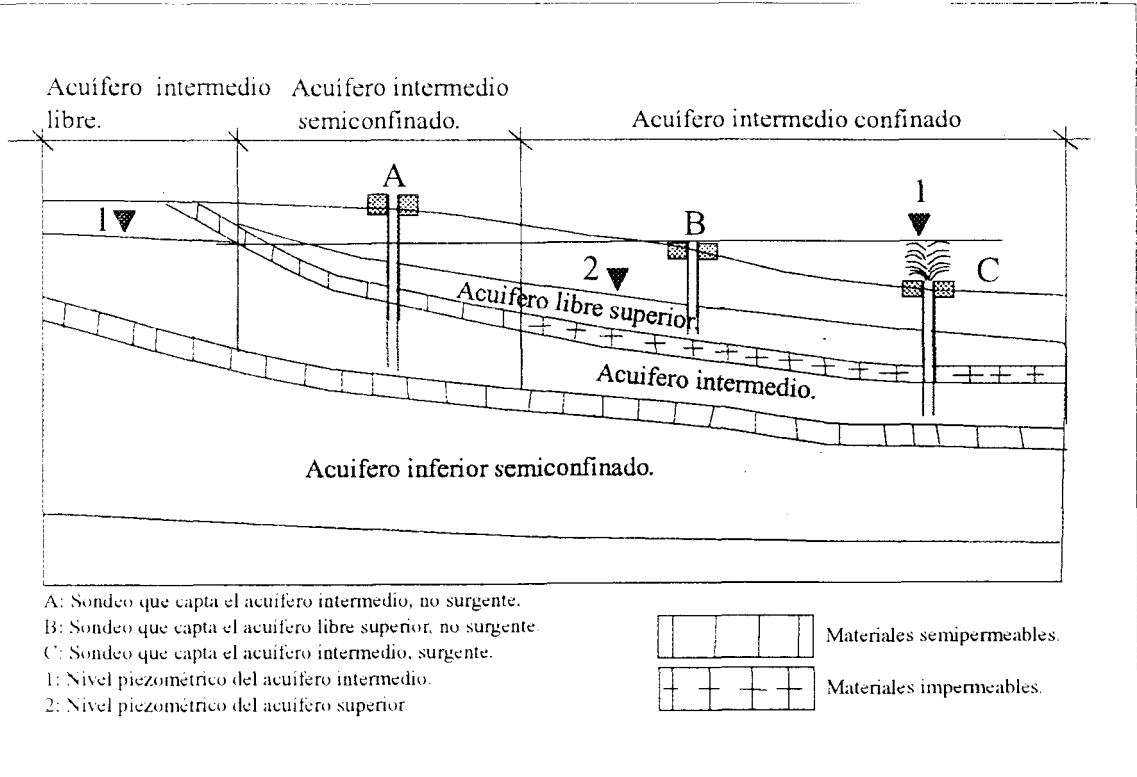
* **Acuíferos libres:** Se trata del modelo más simple, consisten en una estructura geológica permeable, saturada de agua hasta cierto nivel, por encima del cual existe una franja de terreno permeable no saturada, a través de la cual circula el agua de recarga. Si abrimos una captación (pozo, sondeo, etc.) el agua asciende hasta el nivel que tiene en el acuífero, encontrándose la presión atmosférica. El agua extraída del sistema proviene del vaciado de los poros.

El nivel que alcanza el agua en un pozo construido en un acuífero libre marca el nivel freático, que en este caso corresponde con el nivel piezométrico.

* **Acuíferos confinados,** a presión o en carga: la roca permeable que forma el acuífero se encuentra encajada o aislada por encima (techo) y por debajo (muro) de terrenos impermeables. Todo el espesor del acuífero se encuentra saturado de agua, y la presión de ésta en los poros o fisuras es mayor que la atmosférica, de forma que cuando es perforado por un sondeo, asciende a su través quedando a un nivel por encima del punto en que la captación alcanza el acuífero. Cuando el nivel piezométrico se encuentra sobre la superficie del terreno el agua rebosa por la boca de la captación, formando lo que se conoce como un pozo artesiano o surgente.

* **Acuíferos semiconfinados:** la roca encajante no es totalmente impermeable, permitiendo el paso de cierta cantidad de agua a su través, la formación semipermeable se denomina acuitardo. La baja permeabilidad del acuitardo no permite

Figura 2.1.- Modelos de acuífero libre, semiconfinado y confinado.



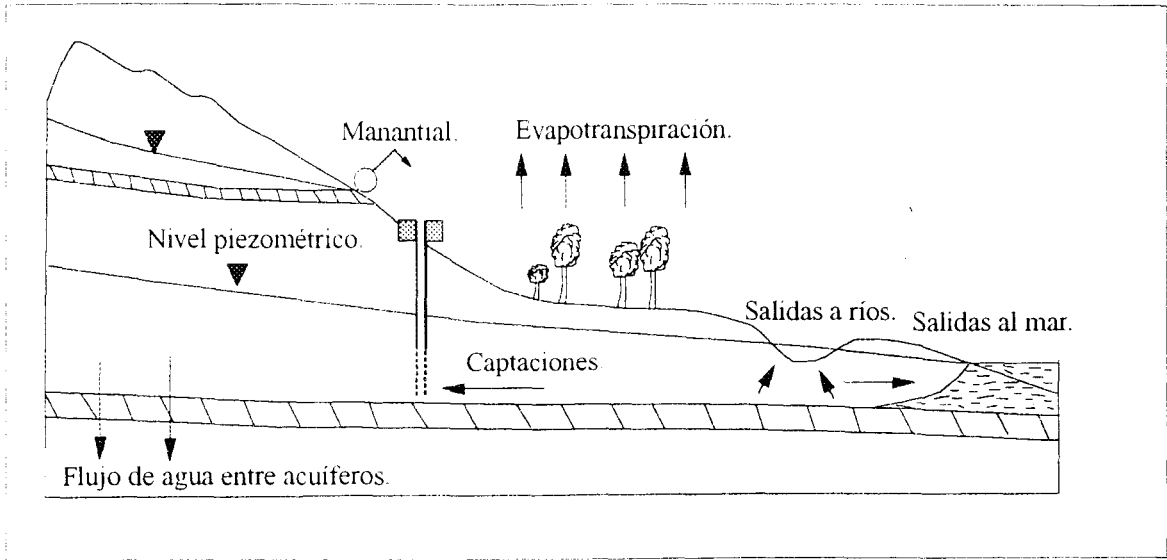
su aprovechamiento mediante captaciones, sin embargo, la cantidad de agua que atravesándolo llega al acuífero puede suponer un porcentaje importante de la recarga total de este. Las características de este tipo de acuífero, pueden considerarse en cierta medida intermedia entre las de uno libre y otro confinado.

Estos modelos tan simplistas no suelen encontrarse en la naturaleza, normalmente se producen estructuras mucho más complejas, de tipo multicapa, en las que se superponen varios acuíferos semiconfinados o en carga, en cuya parte superior puede existir uno libre.

Estos modelos pueden a su vez diferenciarse en:

* **Acuíferos porosos**, cuando están constituidos por materiales sueltos: arenas, gravas, etc., encontrándose el agua en el espacio intragranular que queda entre partículas. Las características del acuífero están determinadas principalmente por la textura (granulometría) de los materiales y el tipo y cantidad de arcillas que contienen, en especial la presencia de arcillas expansibles como las montmorillonitas pueden modificar notablemente las características de transmisividad hidráulica de la porción superior de la zona no saturada y del suelo al formarse grietas de desecación en épocas de fuerte estiaje.

Figura 2.2.- Salida de agua de los acuíferos.



* **Acuíferos karstificados y/o fisurados:** su material constitutivo -la mayoría de las ocasiones con una permeabilidad primaria muy reducida- presenta numerosas grietas, fracturas y oquedades, ya sea debido a procesos de disolución (calizas y dolomías, yesos, etc.) o a la aparición de fracturas de muy diverso origen en materiales insolubles

(granitos, basaltos, etc.) a través de las cuales circula el agua. Estos acuíferos se forman sobre gran variedad de materiales, siendo los de mayor importancia -por el volumen de aguas que se aprovechan- los formados en karst sobre calizas, también pueden encontrarse sobre otros materiales solubles como los yesos, pero la composición de sus aguas (sulfatadas, y en

Figura 2.3.- Entrada de agua a los acuíferos

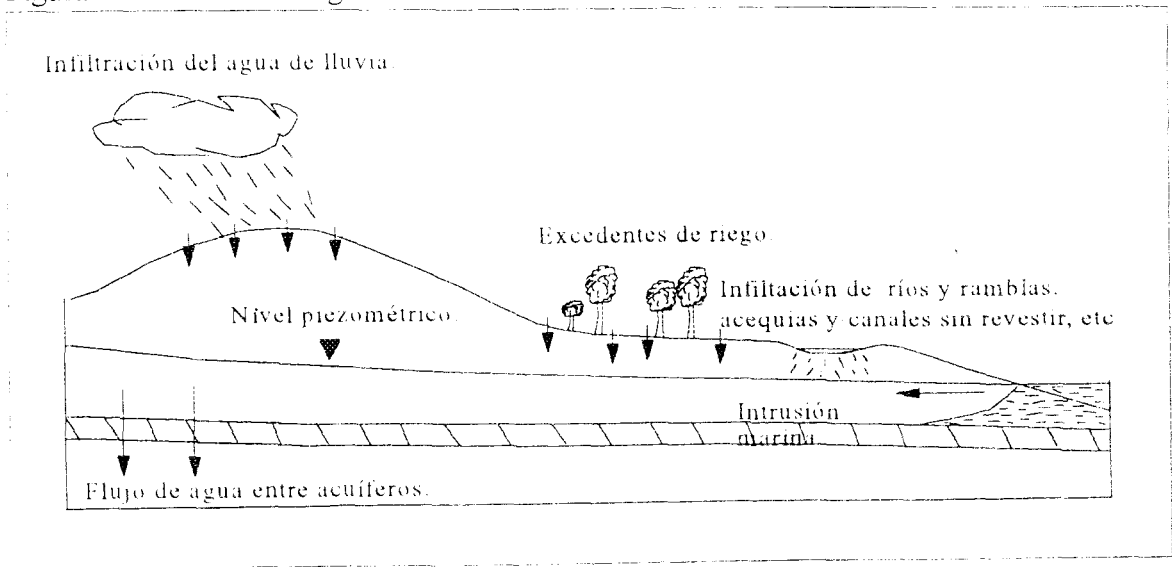


Tabla 2.1 - Valores típicos de permeabilidad (K)

K (m/día)	Calificación estimativa	Posibilidades de acuífero.
$K < 10^{-2}$	Muy baja.	Pozos de menos de 1 l/s con 10 m de depresión teórica
$10^{-2} < K < 1$	Baja.	Entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresión teórica.
$1 < K < 10$	Media.	Entre 10 y 50 l/s con 10 m de depresión teórica.
$10 < K < 100$	Alta.	Entre 50 y 100 l/s con 10 m de depresión teórica.
$K > 100$	Muy alta.	Más de 100 l/s con 10 m de depresión teórica.

IGME (1984)

la mayoría de las ocasiones de elevada mineralización) hace que sean menos aprovechadas. Los materiales menos permeables, como los granitos o los basaltos pueden contener agua cuando se encuentran alterados o presentan fracturas

De forma natural los acuíferos disponen de unas zonas a través de las cuales penetra el agua, son las zonas de recarga y una vez que se llega al límite de su capacidad de almacenar agua de unos "rebosaderos" naturales, son las zonas de descarga.

2.3.- FUNCIONAMIENTO DE LOS ACUÍFEROS.

Para comprender y explicar como pueden influir las características del suelo sobre la composición del agua de un acuífero es necesario conocer en detalle su funcionamiento, en este apartado se explica de forma general la teoría de funcionamiento de los acuíferos.

Un acuífero puede considerarse similar a un embalse superficial, en ambos casos puede hablarse de una capacidad de almacenamiento, de unas entradas y salidas, de una capacidad de regulación, un plan de explotación, etc

El agua de recarga puede proceder de la lluvia o nieve que se infiltran a través de superficies permeables, de la infiltración de ríos o ramblas, de la aportación subterránea de otros acuíferos con los que tiene contacto hidráulico, etc. Debido a la acción del hombre han surgido nuevas fuentes de recarga, que en muchos casos representan un volumen muy significativo del total de agua infiltrada, estas fuentes son:

- Retornos de riego.
- Infiltración de canales y acequias no revestidos o en mal estado.
- Fugas de embalses, infiltración de vertidos urbanos o de otro tipo.
- Formas controladas de infiltración, principalmente las balsas de infiltración, y los sondeos de inyección.

Tabla 2.2.- Valores típicos de porosidad.

Materiales	m%
Depósitos no consolidados	
Gravas	25-40
Arenas	25-40
Limos	35-70
Arcillas	40-70
Rocas	
Basalto fracturado.	5-50
Calizas kársticas	5-50
Areniscas.	5-30
Calizas, dolomías.	0-20
Pizarras.	0-20
Rocas cristalinas fracturadas.	0-10
Rocas cristalinas compactas.	0-5

IGME (1984)

El agua sale del acuífero, y lo hace, en el caso de encontrarse en funcionamiento en régimen natural, (antes de realizar captaciones de aguas subterráneas), por manantiales, descargas a cauces de ríos, hacia otros acuíferos vecinos, y en el caso de tratarse de un acuífero costero, al mar

En condiciones de régimen natural, un acuífero está mal aprovechado, porque no se utilizan las descargas de los manantiales al no adaptarse éstas al programa de demandas y no se pueden controlar eficazmente las descargas subterráneas.

2.4.- PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE UN ACUÍFERO.

La propiedad de la roca que la hace almacenar agua es la porosidad que se define como: "*fracción de espacios vacíos que contiene un material sólido respecto al volumen total*". Es preciso diferenciar la *porosidad total* que acaba de ser definida de la *porosidad eficaz* que se refiere únicamente a los poros interconectados y que por tanto contribuyen al flujo de agua subterránea. La medida de la porosidad de los materiales, sobre todo en el caso de acuíferos libres, puede proporcionar una buena estimación del agua que puede contener.

La roca, además de contener agua debe ser capaz de cederla en cantidades aprovechables, a dicha cualidad se la denomina *permeabilidad* (K). Por ejemplo, hay arcillas que pueden absorber notables cantidades de agua en su espacio poroso (la mayoría de las veces superior al 50% en volumen), pero bajo condiciones naturales no la ceden, sino que la retienen en su masa al encontrarse retenida por intensas fuerzas capilares.

La permeabilidad se define como el flujo de agua que atraviesa una sección unitaria de acuífero bajo la influencia de un gradiente unitario a la temperatura de campo.

$$K = \frac{cd^2\gamma}{\mu}$$

donde

- K** = permeabilidad
- c** = constante adimensional
- d²** = factor que depende de la superficie intergranular
- γ** = peso específico del fluido
- μ** = viscosidad del fluido a la temperatura de campo.

caudal de agua que proporciona una sección de ancho unidad de frente acuífero sometida a un gradiente del 100%”.

Las unidades de transmisividad son: $T = (L^3 / T) / L = L^2 T^{-1}$ expresándose normalmente en m²/día.

La permeabilidad es un índice de la facilidad con la que el agua atraviesa los

Tabla 2.3.- Clasificación de los terrenos por su transmisividad (m²/día).

T	1	10	100	1000	
Clasificación	Impermeables	Poco Permeable	Algo Permeable	Permeable	Muy Permeable
Calificación del acuífero	Sin acuífero	Acuífero muy pobre	Acuífero pobre	Acuífero de regular a bueno.	Acuífero excelente.
Tipo de materiales	Arcilla compacta. pizarra. granito.	Limo arenoso. limo. arcilla limosa	Arena fina. arena limosa. caliza poco fracturada. basaltos.	Arena limpia. grava y arena. arena fina. caliza fracturada.	Grava limpia. dolomías. calizas muy fracturadas

Custodio, E. (1983)

El término $cd^2=k$ se conoce como *permeabilidad específica o intrínseca*, y depende únicamente de las características del terreno. La permeabilidad, $K = LT^{-1}$, se expresa normalmente en m/día

En general, permeabilidad y porosidad son parámetros que definen las características hidráulicas del acuífero. En la práctica se utiliza el parámetro *transmisividad* (T), que es el producto de la permeabilidad del acuífero por su espesor saturado. La transmisividad se define también como “el

materiales del acuífero, pero no dice nada sobre la cantidad que puede ceder.

Otro parámetro importante es el *coeficiente de almacenamiento* (S), representa la cantidad de agua cedida por un prisma de acuífero de un metro cuadrado de sección y altura la de éste cuando el nivel piezométrico desciende un metro.

El coeficiente de almacenamiento no siempre depende de forma exclusiva, como en principio pudiera parecer, de la

Tabla 2.4.- Valores típicos de coeficientes de almacenamiento.

Tipo de material permeable.	Forma de funcionamiento del acuífero.	Valores medios de S.
Kárstico Calizas y dolomías Jurasicas Calizas y dolomías Cretácicas y terciarias.	Libre	$2 \cdot 10^{-2}$
	Semiconfinado	$5 \cdot 10^{-4}$
	Confinado	$2 \cdot 10^{-5}$
Calizas y dolomías Cretácicas y terciarias.	Libre	$2 \cdot 10^{-2} - 6 \cdot 10^{-2}$
	Semiconfinado	$10^{-3} - 5 \cdot 10^{-4}$
	Confinado	$10^{-4} - 5 \cdot 10^{-5}$
Poroso intergranular: Gravas y arenas.	Libre	$5 \cdot 10^{-2} - 15 \cdot 10^{-2}$
	Semiconfinado	10^{-3}
	Confinado	10^{-4}
Kársticos y porosos: Calcarenitas marinas terciarias.	Libre	$15 \cdot 10^{-2} - 18 \cdot 10^{-2}$

IGME 1984

porosidad eficaz del acuífero pues el agua que una formación puede ceder proviene, además de vaciado de los poros, de un proceso de distensión elástica de la estructura (especialmente en acuíferos en carga o a presión). El efecto más inmediato de esta propiedad es que acuíferos en apariencia similar (con la misma cantidad de espacio poroso) pueden proporcionar cantidades de agua diferentes

Los conceptos hasta ahora definidos son suficientes para explicar lo que se entiende por capacidad de almacenamiento o reservas, que en definitiva será la cantidad de agua utilizable mediante bombeos. las reservas como el producto de la superficie del acuífero por su espesor saturado de agua y por su coeficiente de almacenamiento

2.5.- OTROS CONCEPTOS Y DEFINICIONES.

Nivel piezométrico, nivel freático.

La superficie freática se define como: "el lugar geométrico de los puntos de agua donde la presión hidrostática se iguala a la presión atmosférica", es el nivel que alcanza el agua en un acuífero libre. El agua puede ascender aún más por efecto de las fuerzas capilares, encontrándose en este caso sometida a una presión negativa.

El nivel piezométrico en un punto del acuífero es el nivel que alcanzaría el agua si se pone en contacto con la atmósfera. Nivel piezométrico y nivel freático coinciden en el caso de acuíferos libres.

En la figura 2.4 puede verse un esquema que muestra las relaciones entre nivel piezométrico y freático

Suelo, zona no saturada

Con frecuencia, en los trabajos de contaminación de las aguas subterráneas se habla de forma indistinta refiriéndose al suelo y a la zona no saturada, prefiriéndose la palabra suelo como término genérico con lo que frecuentemente se hace referencia a suelos que tendrían según este criterio decenas o incluso centenares de metros de espesor (¿?). En este tipo de trabajo debiera considerarse el suelo tal y como es considerado en la edafología, pues se trata de una unidad claramente diferenciada del resto de la zona no saturada y con la entidad e importancia suficientes para hacerlo así, el suelo es además la parte más activa desde el punto de vista de depuración de las aguas al contener la mayoría de la materia orgánica de la zona no saturada y mantener la actividad biológica

Así pues se define el suelo como "La materia mineral no consolidada de la superficie de la tierra que esta sujeta a la influencia de los factores genéticos y medioambientales (material original, clima incluyendo temperatura y régimen de humedad, macro y micro organismos, topografía), los cuales interactuando durante prolongados periodos de tiempo proporcionan unas propiedades biológicas, físicas, químicas y morfológicas características

La zona no saturada es la porción superior del acuífero cuyos poros no se encuentran saturados de agua, incluyendo el suelo y la franja de agua capilar

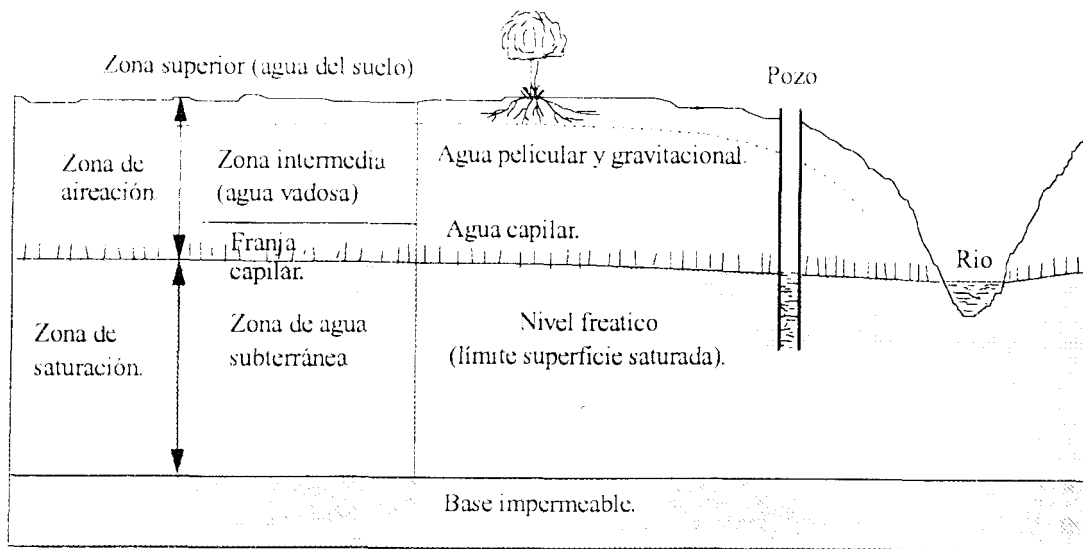
En la figura 2.4 se muestra de forma esquemática la distribución del agua en el subsuelo. En principio, cabe diferenciar dos zonas principales, la zona de agua subterránea o de saturación, en la cual todos los poros se encuentran llenos de agua, su límite superior lo constituye el nivel freático, la interfase entre la zona de saturación y de aireación -que es la otra zona principal- no es abrupta, está formada por una franja de agua capilar de mayor o menor espesor según las características de los materiales acuíferos. En la zona de aireación, también llamada intermedia o vadosa, los poros pueden estar llenos de aire, con agua en tránsito hacia la zona saturada por efecto de la gravedad (agua gravitacional) o con agua retenida por fuerzas capilares o peliculares (agua capilar o pelicular). Por último, en la porción superior, se encuentra el agua del suelo, en todo similar a la de la zona no saturada

Calidad, contaminación del agua.

Como se vio en el capítulo anterior, pueden encontrarse aguas de pésima calidad (muy sulfatadas, cloruradas, o duras, etc) sin que por ello se encuentren contaminadas, incluso el hecho de introducir sustancias extrañas puede llegar a mejorar la calidad del agua para un uso determinado (es el caso del exceso de nitratos en la agricultura), por ello definir lo que se entiende como contaminación plantea más problemas de los que en principio pudiera parecer sobre todo si como sucede frecuentemente se intenta relacionar de forma directa las ideas de calidad y contaminación.

En general se ha relacionado siempre el carácter de un agua como contaminada y la adecuación al uso que de ella se hace,

Figura 2.4 Suelo, zona no saturada y acuífero.



Según Bear (1982).

cuando -como veremos mas adelante- no siempre debería ser así. La legislación define contaminación del agua como «*La acción y el efecto de introducir materias o formas de energías, o introducir condiciones en el agua que, de modo directo o indirecto, impliquen una alteración perjudicial de su calidad en relación con los usos posteriores o con su función ecológica*». El concepto de degradación del dominio público hidráulico a efectos de esta ley incluye las alteraciones perjudiciales del entorno afecto a dicho dominio.

Por su parte Custodio (1983) presenta la siguiente definición: «*Un curso de agua se considera polucionado cuando la composición o el estado de sus aguas son directa o indirectamente modificadas por la actividad del hombre en una medida tal que su utilización se ve restringida para todos o*

para algunos de aquellos usos para los que podría servir en estado natural »

De lo anteriormente expuesto se deduce que agua natural no es necesariamente sinónimo de calidad, un agua natural no tiene por que ser apta al uso que de ella queramos hacer como es el caso de aguas duras que son poco adecuadas para los circuitos de refrigeración pero pueden ser perfectamente utilizables para el consumo, en el caso opuesto, cuando un elevado contenido en nitratos desaconseja el uso del agua para bebida y sin embargo puede ser perfecta para el riego o circuitos de refrigeración.

Vulnerabilidad, riesgo, afección.

La definición más aceptada y también más intuitiva considera la vulnerabilidad como: "la sensibilidad de las aguas subterráneas a

una alteración de la composición originada por actividades de origen antrópico", según esta definición la vulnerabilidad está condicionada por características intrínsecas a la formación acuífera (porosidad, permeabilidad, profundidad del nivel freático, etc.), y extrínsecas, como la climatología, características de las formaciones encajantes, etc

La afección será la situación de deterioro debida a la acción de sustancias o agresiones de otra índole.

Sin embargo con frecuencia se confunden ambos términos y se mezclan incluso con el de áreas de recarga o influencia, un ejemplo de notable trascendencia lo tenemos en la

Directiva Europea de Nitratos e incluso en su transposición a la legislación española, en las que se definen como zonas vulnerables áreas que sin duda deberían ser definidas como de recarga o de influencia: "Zonas vulnerables son todas las superficies conocidas del territorio cuya escorrentia fluya hacia las aguas afectadas por la contaminación y las que podrían verse afectadas si no se toman medidas oportunas, y que contribuyan a la contaminación".

En este trabajo se considerará la vulnerabilidad como sensibilidad, la afección como la situación de deterioro y el riesgo como la conjunción de vulnerabilidad y presencia de una actividad potencialmente contaminante.