

Conceptos Fundamentales de Hidrogeología

Clasificación de las formaciones geológicas según su comportamiento hidrogeológico

Acuífero [*aquifer*]¹ (del latín *fero*, llevar).- Formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable y que permite que circule a través de ella con facilidad.

Ejemplos: Arenas, gravas. También granito u otra roca compacta con una fracturación importante.

Acuicludo [*aquiclude*] (del latín *cludo*, encerrar).- Formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable y que no permite que el agua circule a través de ella .

Ejemplo: Limos, arcillas. Un m³ de arcillas contiene mas agua que el mismo volumen de arenas, pero el agua esta atrapada, no puede salir por gravedad, y por tanto no podrá circular en el subsuelo ni en condiciones naturales ni hacia un pozo que esté bombeando.

Acuitardo [*aquitard*] (del latín *tardo*, retardar, impedir).- Formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable pero que el agua circula a través de ella con dificultad.

Evidentemente se trata de un concepto intermedio entre los dos anteriores.

Ejemplos: Arenas arcillosas, areniscas, rocas compactas con alteración y/o fracturación moderadas.

Acuífugo [*aquifuge*] (del latín *fugo*, rechazar, ahuyentar).- Formación geológica que no contiene agua porque no permite que circule a través de ella.

Ejemplo: granito o esquisto inalterados y no fracturados.

De estas cuatro denominaciones, es la menos utilizada.

No se trata de definiciones en sentido estricto, ya que no tienen unos límites precisos que permitan delimitar si una formación concreta se incluye o no en la definición, pero son términos utilizados constantemente en la bibliografía hidrogeológica (el primero de ellos usado en el lenguaje común)

En una región sin mejores recursos, una formación de la que una captación pudiera extraer 0,5 litros/seg. se denominaría “acuífero”, y su explotación sería interesante. En cambio, en una zona con buenos acuíferos, esa formación se denominaría “mal acuífero” o “acuífero pobre” o “acuitardo”, y probablemente una perforación con ese caudal se cerraría.

Unidad hidrogeológica (en inglés, a veces “sistema hidrogeológico”) es un conjunto de formaciones geológicas cuyo funcionamiento hidrogeológico conviene considerar conjuntamente. Dentro de la unidad podrá haber uno o varios acuíferos y quizá acuitardos o acuicludos entre ellos. Se consideran una unidad porque están conectados de modo que su funcionamiento (entradas, salidas, balance) hay que estudiarlo de un modo conjunto.

Esta agrupación de formaciones es relativamente subjetiva, depende de la escala y de los objetivos del trabajo. Una unidad puede subdividirse en unidades menores.

¹ A lo largo de todo el tema se indica el nombre en inglés entre corchetes []

Porosidad total y eficaz

Porosidad total [*porosity*] (m_t):

$$m_t = \text{Volumen de huecos} / \text{volumen total}$$

Puede expresarse en % o en tanto por 1 (en cualquier caso es adimensional). Es decir que 28% es equivalente a 0,28, pero dejando claro cómo se está expresando, porque también puede existir una porosidad extremadamente baja del 0,28%

Porosidad eficaz [*specific yield*] (m_e):

$$m_e = \text{Volumen de agua drenada por gravedad} / \text{volumen total}$$

El numerador de esta expresión representa el volumen de los poros que se ha **vaciado**. Se expresa igual que la porosidad total (% o en tanto por 1).

Retención específica: Diferencia entre los dos parámetros anteriores.

Ejemplo (figura 1):

Disponemos de 1 m³ de arena seca, le introducimos agua hasta que esté completamente saturado (todos los poros llenos de agua). Supongamos que para ello hemos necesitado 280 litros. Después dejamos que el agua contenida escurra libremente; supongamos que recogeríamos 160 litros. Evidentemente los 120 litros que faltan se han quedado mojando los granos.

Con estos datos podemos calcular:

$$1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ dm}^3 \approx 1000 \text{ litros}$$

$$m_t = 280 / 1000 = 0,28 \approx 28\%$$

$$m_e = 160 / 1000 = 0,16 \approx 16\%$$

$$\text{Retención específica} = 0,28 - 0,16 = 0,12 \approx 12\%$$

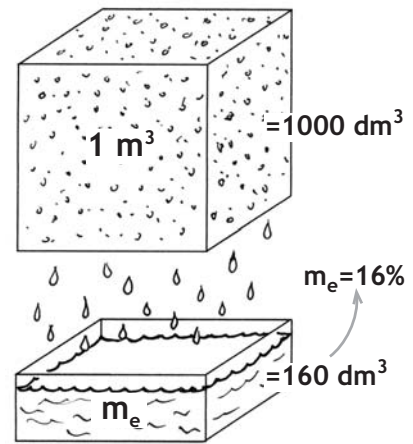
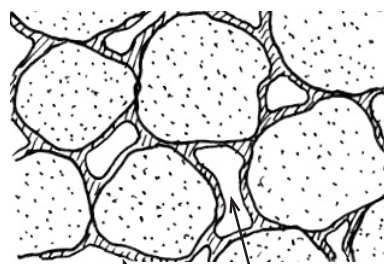


Fig.1.- Ejemplo de porosidad eficaz por drenaje. Este volumen es el

Porosidad eficaz para el flujo [*effective porosity*]



Agua adherida a los granos

Porosidad eficaz: volumen extraíble, sección útil para el flujo

Fig.2.- El agua adherida a los granos no puede ser extraída y tampoco forma parte de la sección disponible para el flujo

También se define la porosidad eficaz como el volumen de huecos disponible para el flujo respecto del volumen total. Aproximadamente son cantidades equivalentes: el agua que queda adherida a los granos y que no puede extraerse tampoco permite el flujo: En la figura 2 representamos en rayado el agua adherida a los granos; los huecos que quedan (en blanco en el dibujo) representan tanto el agua extraíble como la sección utilizable por el flujo del agua subterránea.

La diferencia entre ambas porosidades eficaces serían “las calles sin salida”, grupos de poros que disponen de posible salida del agua que contienen, pero no por ambos lados para permitir el flujo a través de ellos.

En inglés (americano) los dos conceptos de porosidad eficaz que hemos visto reciben denominaciones distintas:²:

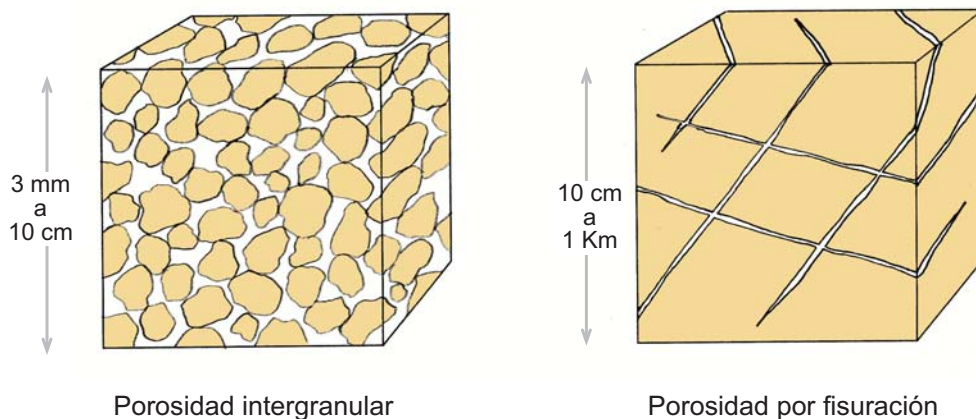
- *Specific yield* nos informa del volumen de **agua que podemos obtener** vaciando un medio poroso saturado. En español podría denominarse *porosidad eficaz de drenaje*.
- *Effective porosity* se refiere a la porosidad que **permite la circulación del agua**. En español podría ser *porosidad eficaz de flujo*.

En español normalmente en el uso cotidiano para ambos conceptos se dice “porosidad eficaz”.

Por todo ello, si disponemos de un valor numérico, generalmente lo asignaremos a ambos conceptos. No obstante, en ocasiones se distinguen: por ejemplo en el modelo de flujo MODFLOW, se solicitan separadamente valores de *specific yield* y de *effective porosity*.

Porosidad intergranular y por fisuración

Al hablar de porosidad, intuitivamente se piensa en los poros de un material detrítico, como unas arenas. Pero las rocas compactas también pueden contener cierta proporción de agua en su interior en sus **fisuras**. Normalmente, estas fisuras son fracturas producidas por esfuerzos tectónicos, pero pueden deberse a otras causas: enfriamiento (rocas volcánicas), planos de descompresión o discontinuidades sedimentarias, etc. Tras su formación, estas fisuras pueden ser ocluidas por los minerales arcillosos resultantes de la alteración, o por el contrario la disolución hace aumentar la abertura, a veces hasta formar amplios conductos (especialmente en calizas).



Las escalas señaladas en el dibujo son meramente indicativas, para mostrar que la porosidad por fisuración se presenta a escalas muy diversas.

También se habla de **porosidad primaria y secundaria**. Se denomina *porosidad primaria* a la que resulta al originarse la formación geológica; *porosidad secundaria* será cualquier abertura que se produzca posteriormente.

Los poros de unas arenas son porosidad primaria. Las fracturas que se producen en una roca compacta debido a esfuerzos tectónicos son porosidad secundaria. En ocasiones se presentan los dos tipos en la misma formación geológica (*porosidad dual*): una arenisca presenta porosidad primaria entre los granos y porosidad secundaria a través de las fracturas u otros planos de discontinuidad de la roca.

² La traducción literal de estos conceptos es “rendimiento específico” y “porosidad efectiva”, pero ambos son confusos para el uso cotidiano: el primero se confunde con “retención específica” (su opuesto) y el segundo es similar al genérico “porosidad eficaz”.

Factores

Tanto la porosidad total como la eficaz dependen de:

- La heterometría: los finos ocupan los poros que dejan los gruesos y la porosidad disminuye.
- La forma y disposición de los granos.
- La compactación, cementación y recristalización, que van a ir disminuyendo la porosidad

En el caso de la porosidad intergranular, **la porosidad total no depende del tamaño de grano** (piénsese que el porcentaje de huecos en el dibujo anterior sería el mismo si lo reprodujéramos ampliado o reducido). En cambio **la**

porosidad eficaz sí se ve muy afectada por el tamaño de grano: si es más fino, la retención específica aumenta. En la figura 4³ se muestra la variación de la porosidad total y eficaz en función de la granulometría para materiales no consolidados. La porosidad total es máxima para las arcillas, pero la eficaz es casi nula. La “porosidad eficaz” aquí se refiere a *specific yield* (porosidad eficaz para drenaje).

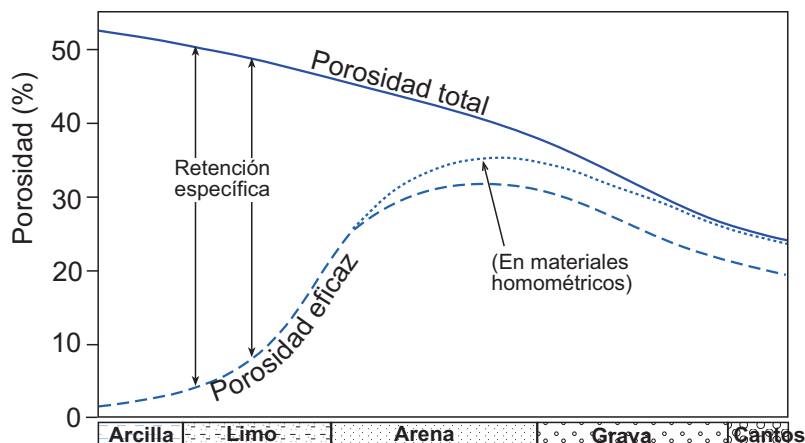


Fig. 4.- Variación de la porosidad con la granulometría en materiales detríticos no consolidados

En las numerosas reproducciones de este gráfico, en el eje horizontal a veces figura el diámetro 10%⁴ y otras veces el diámetro medio). Como en ningún caso se indica el grado de heterometría de los materiales, podemos suponer que este famoso gráfico nos aporta solamente una información cualitativa, no cuantitativa.

También puede estimarse la porosidad **eficaz** en el **triángulo arenas-limos-arcillas** de la figura 5 (Johnson, 1967, p. D8).

En ambos gráficos, la “porosidad eficaz” se refiere a *specific yield* (porosidad eficaz para drenaje).

La porosidad también puede estimarse mediante la expresión⁵:

$$m = 0,255 \cdot (1 + 0,83^u)$$

$$u = d_{60} / d_{10}$$

d_{60} , d_{10} = tamaños de grano por debajo de los cuales se encuentran el 60% y el 10% del peso del material.

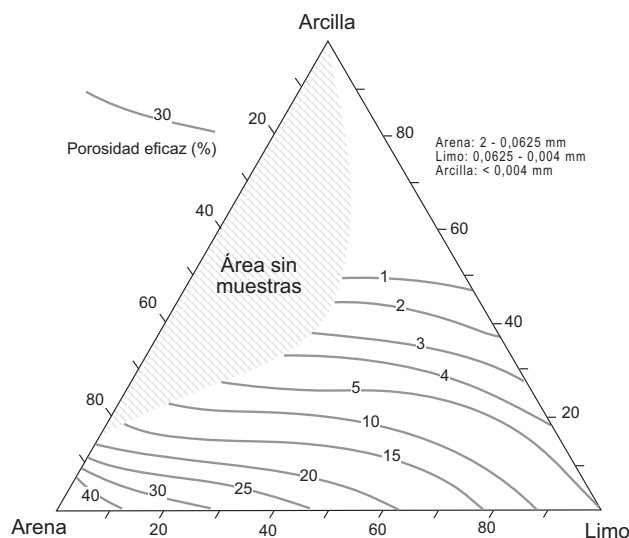


Fig. 5.- Relación granulometría-porosidad eficaz

³ Este gráfico está reproducido con variaciones en manuales y publicaciones, la mayoría de las veces sin citar su origen. Es difícil concretar su primer autor, posiblemente Conkling (1934, p. 68) o Eckis (1934, p.90). Nuestra figura 4 es una modificación del presentado por Stephens et al. (1998)

⁴ Tamaño tal que el 10% del material es más fino y el 90% es más grueso.

⁵ Según Vukovic y Soro (1992), citado en Odong (2008). Debe referirse a la *porosidad total*, aunque no se especifica.

La **porosidad por fracturación** está determinada por la historia tectónica de la zona y por la litología; es decir: cómo cada tipo de roca ha respondido a los esfuerzos. Como se indicaba más arriba, en este tipo de porosidad es determinante la posible disolución de la fractura o, por el contrario, la colmatación por minerales arcillosos o precipitación de otros minerales.

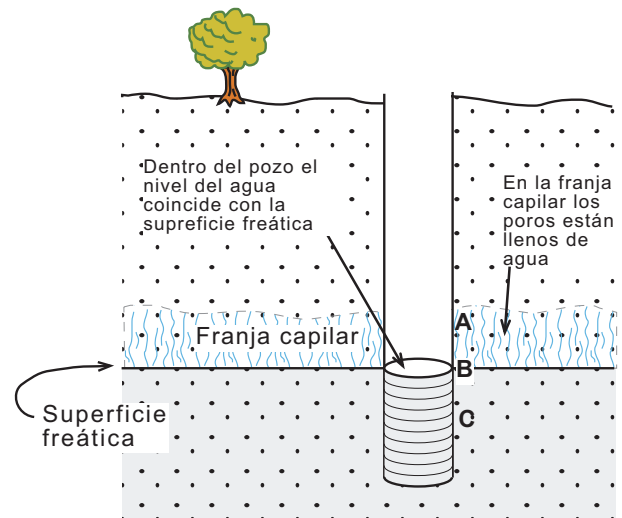
Superficie freática. Acuíferos colgados

Los poros o fisuras del terreno están llenos de agua ("saturados") hasta un determinado nivel que se denomina **superficie freática** [*water table*], siempre que exista infiltración procedente de las precipitaciones. Cuando esta superficie es cortada por un pozo, en éste el nivel del agua coincidirá con la superficie freática: se habla del **nivel freático** en ese punto.

El concepto de superficie freática no es tan simple: sobre ella existe una franja de terreno saturada (poros llenos de agua), ya que el agua ha ascendido por **capilaridad**. El espesor de esta **franja capilar** puede ser inapreciable en gravas hasta alcanzar varios metros en arcillas.

La superficie freática es la superficie formada por los puntos con una presión igual a la presión atmosférica.

En **B**, la presión del agua es igual a la presión atmosférica; por encima (punto **A**) la presión es inferior a la atmosférica: por eso el agua asciende succionada contra la gravedad; y por debajo (**C**) es superior, ya que soporta la presión de la columna de agua **BC**.



En general, se denomina **zona saturada** a la parte del subsuelo que se encuentra por debajo de la superficie freática, y en la que todos los poros o fisuras están llenos de agua. Por encima de la superficie freática hablamos de **zona no saturada**, aunque en ella pueden existir poros húmedos o incluso saturados (además de la franja capilar ya explicada, por ejemplo, masas de agua que están descendiendo por gravedad procedentes de precipitaciones recientes).

La superficie freática en una región es continua y suele presentar una forma similar a la topografía, pero suavizada (figura 7.a). Esto necesita una cierta infiltración procedente de las precipitaciones y que no exista sobreexplotación (extracción por bombeos excesiva).

A veces, cuando la superficie freática regional se encuentra a cierta profundidad y existe un nivel impermeable que lo sustente, se producen **acuíferos colgados** [*perched aquifers*], normalmente de dimensiones reducidas y sin gran importancia dentro de los recursos hídricos de la región (figura 7.b).

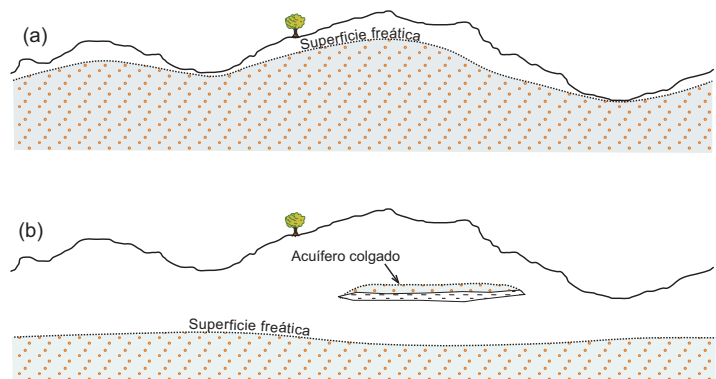
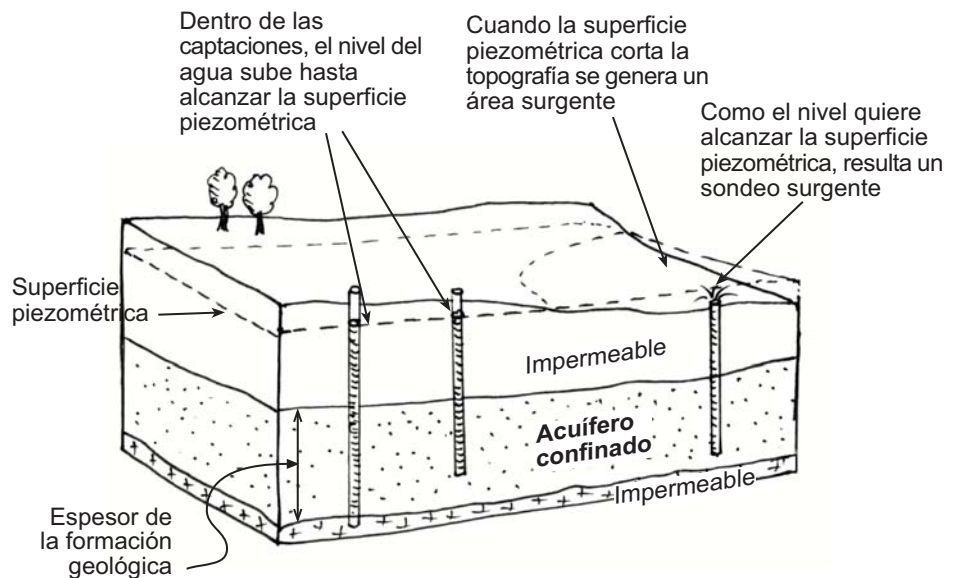
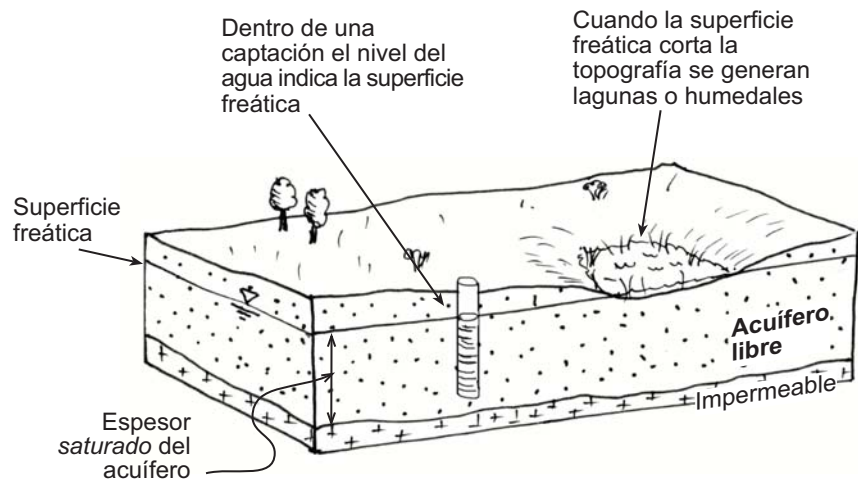


Fig. 7.- (a) Superficie freática paralela a la topografía.
(b) Superficie freática profunda y acuífero colgado

Tipos de acuíferos: libres, confinados y semiconfinados

Se denominan **acuíferos libres** [*unconfined aquifers*] aquellos que su límite superior (la superficie freática) está a presión atmosférica. Si extraemos agua, descenderá la superficie freática igual que descende el nivel cuando extraemos agua de una piscina.

En cambio, en los **acuíferos confinados** [*confined aquifers*] su límite superior se encuentra a presión superior a la atmosférica: es una capa impermeable; si extraemos agua de él, ningún poro se vacía, la extracción procede de la descompresión del agua y en menor medida de la compresión de la matriz sólida. Si esa compresión del acuífero es notoria y no es reversible, llegarán a producirse asentamientos y **subsistencia** del terreno.



Si se perfora un sondeo y la perforación alcanza la superficie freática de un acuífero libre, el nivel del agua en la perforación permanece en el mismo nivel en que se cortó. Es tan simple como cuando en la playa abrimos un hoyo con las manos, y en el fondo aparece agua, ya que la arena de la playa está saturada hasta la altura del nivel del mar.

En cambio, cuando una perforación alcanza el techo de un acuífero confinado, el nivel del agua dentro de la perforación puede subir varios metros.

Mientras que en los acuíferos confinados el espesor es fijo (es el espesor de la formación geológica que constituye el acuífero), en los acuíferos libres se habla de **espesor saturado**, (hasta la superficie freática), que puede variar si sube o baja la superficie freática..

La superficie virtual formada por los puntos que alcanzaría el agua si se hicieran infinitas perforaciones en el acuífero, se denomina **superficie piezométrica** [*piezometric surface*], y en un punto concreto, en un pozo, se habla de **nivel piezométrico** (en griego: piezo = presión)

Cuando la superficie piezométrica está por encima de la superficie topográfica, se producen los **sondeos surgentes** [*flowing well*].

La denominación "pozo o sondeo **artésiano**" [*artesian well*] es equívoca. Para algunos autores *artésiano* es sinónimo de *confinado* y para otros de *surgente*, por lo cual es mejor evitarla⁶

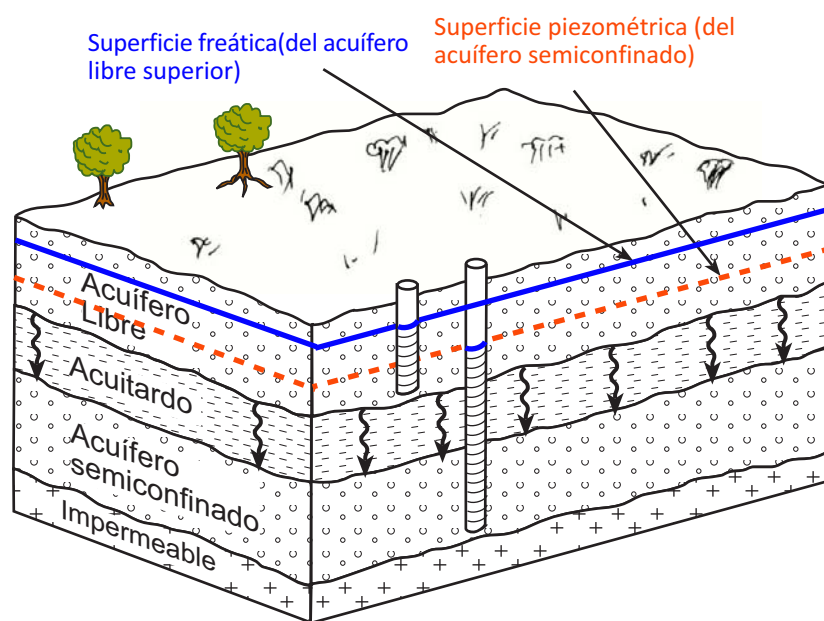
La surgencia no es un indicador de la productividad de la captación: un sondeo surgente al ser bombeado puede proporcionar un caudal mínimo que lo haga inexplorable. La surgencia refleja la altura de la presión del agua (veremos después que no es exactamente la presión, sino el "potencial hidráulico"), mientras que el caudal que puede proporcionar el sondeo depende de la Transmisividad y del Coeficiente de Almacenamiento (que veremos en el siguiente apartado).

Más frecuentes que los acuíferos confinados perfectos son los **acuíferos semiconfinados** [*leaky aquifer*]. Son acuíferos a presión (por tanto entrarían en la definición anterior de acuíferos confinados), pero que alguna de las capas confinantes son semipermeables, acuitardos, y a través de ellas le llegan filtraciones o rezumes (en inglés: *leak* = rezume)

Vemos en la figura adjunta un **acuífero libre** y un **semiconfinado** separados por un **acuitardo**. Se aprecia que el nivel del agua en el libre es más alto que en el sondeo que corta el acuífero profundo (la entubación de este sondeo solo estaría ranurada en el acuífero inferior). Por tanto, aunque la permeabilidad del acuitardo sea muy baja, se producirá un flujo de agua a través del mismo hacia abajo.

Si el sistema se mantuviera estable, sin alteraciones desde el exterior durante el tiempo suficiente, el flujo a través del acuitardo equilibraría los niveles, la superficie freática y piezométrica se superpondrían y cesaría el flujo (no habría gradiente hidráulico que obligara al agua a circular). Pero una situación como la del dibujo puede mantenerse indefinidamente debido a la explotación del acuífero inferior o a la llegada de agua al superior por infiltración de las precipitaciones.

No siempre la alimentación debe llegarle desde arriba: si bajo el semiconfinado hubiera otro acuitardo, y más abajo un acuífero con una presión mayor, se produciría una filtración vertical ascendente.



⁶ "Artesianos" tiene su origen en la región de Artois, Francia, donde el siglo XII los monjes del monasterio de Lillers realizaron perforaciones surgentes (Needham, J., 1970, p. 34); parece que mucho antes existían perforaciones surgentes en China y Damasco.

Coeficiente de almacenamiento

Hemos visto que el volumen de agua que proporciona un acuífero libre se puede calcular mediante la porosidad eficaz. Pero este parámetro no nos sirve en el caso de los acuíferos confinados: cuando proporcionan agua, ya que todos sus poros continúan saturados, sólo disminuye la presión, de modo que el dato de la porosidad eficaz no indica nada. Necesitamos un parámetro que indique el agua liberada al disminuir la presión en el acuífero: el **Coeficiente de almacenamiento (S)** [Storativity] que se define así:

$$S = \frac{\text{Volumen de agua liberado}}{\text{Volumen total que ha bajado la superficie piezométrica}}$$

En la figura (a) vemos una columna de 1 m² de base de un **acuífero confinado**, en la que la **superficie piezométrica** ha bajado 1 m. El pequeño volumen de agua obtenido es S.

Esta definición refleja también el concepto de *porosidad eficaz*: en la figura (b) una columna de 1 m² de base de un **acuífero libre** en la que la **superficie freática** ha bajado un metro; el volumen de agua obtenido es la **porosidad eficaz** (*specific yield*). Pero son dos conceptos distintos:

En el **libre**, sólo aporta agua (por vaciado) el m³ superior, entre las dos posiciones sucesivas de la superficie freática.

En el **confinado** aporta agua (por descompresión) toda la columna vertical de acuífero; por tanto, su magnitud depende del espesor geológico del acuífero.

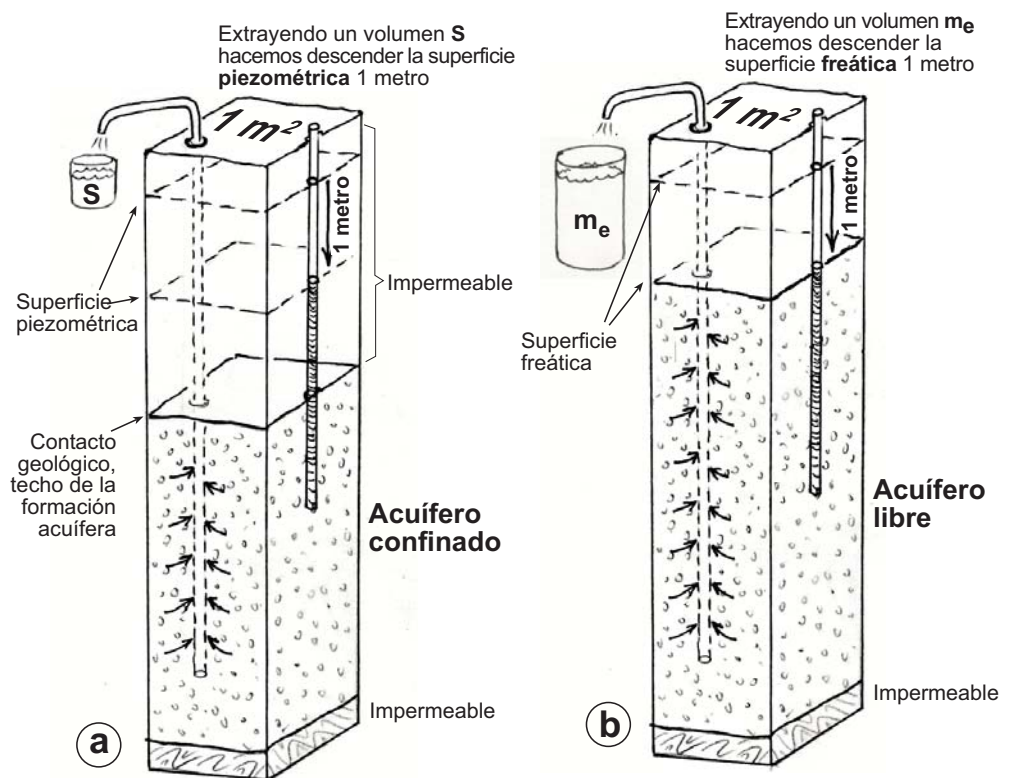
Un concepto distinto es el **Almacenamiento específico** [Specific Storage] (S_s) que es el volumen liberado por 1 m³ de acuífero confinado (no por toda la columna de acuífero) al descender 1 m. la superficie piezométrica.

Por tanto: $S_s = S / \text{espesor}$

En la práctica se utiliza el **coeficiente de almacenamiento, S** (Storativity), ya que es el parámetro que nos indica el agua que podemos obtener de acuíferos confinados y semiconfinados. El valor de S_s se utiliza, por ejemplo en MODFLOW.

El Almacenamiento específico (Specific Storage, S_s) es igual a:

$$S_s = g \cdot \rho (\alpha + m \cdot \beta)$$



donde: g = gravedad; ρ = densidad del agua; m = porosidad;
 α = compresibilidad de la matriz sólida del acuífero
 β = compresibilidad del agua

El coeficiente de almacenamiento es, como la porosidad eficaz, **adimensional** (volumen / volumen), y los valores que presenta son mucho más bajos en los confinados perfectos que en los semiconfinados. Los valores típicos serían éstos:

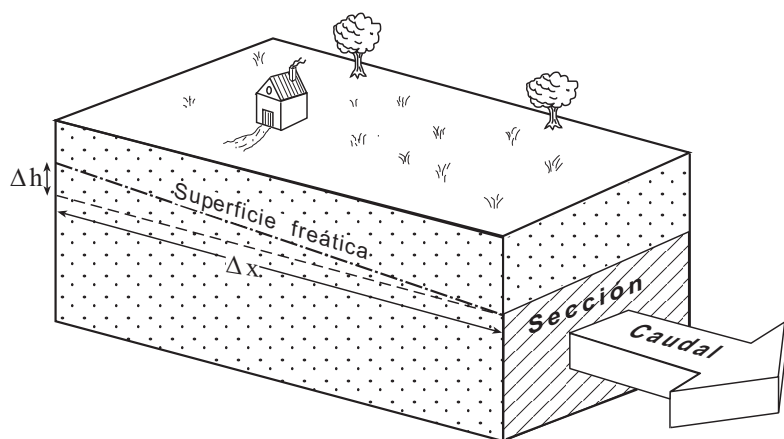
Acuíferos libres (porosidad eficaz): 0,3 a 0,01 ($3 \cdot 10^{-1}$ a 10^{-2})	El agua proviene del vaciado de los poros
Acuíferos semiconfinados (coef. de almacenamiento): 10^{-3} a 10^{-4}	El agua proviene de descompresión y de los rezumes desde las capas confinantes
Acuíferos confinados (coef. de almacenamiento): 10^{-4} a 10^{-5}	El agua proviene de descompresión

Permeabilidad y transmisividad

Permeabilidad es un concepto común y no haría falta definirlo: la facilidad que un cuerpo ofrece a ser atravesado por un fluido, en este caso el agua.

En Hidrogeología, la *permeabilidad* (o mejor: *conductividad hidráulica*, **K**) es un concepto más preciso. Es la constante de proporcionalidad lineal entre el caudal y el gradiente hidráulico:

$$\text{Caudal por unidad de sección} = K \cdot \text{gradiente hidráulico}$$



$$\frac{\text{Caudal}(m^3 / \text{día})}{\text{Sección}(m^2)} = K \cdot \frac{\Delta h (m.)}{\Delta l (m.)}$$

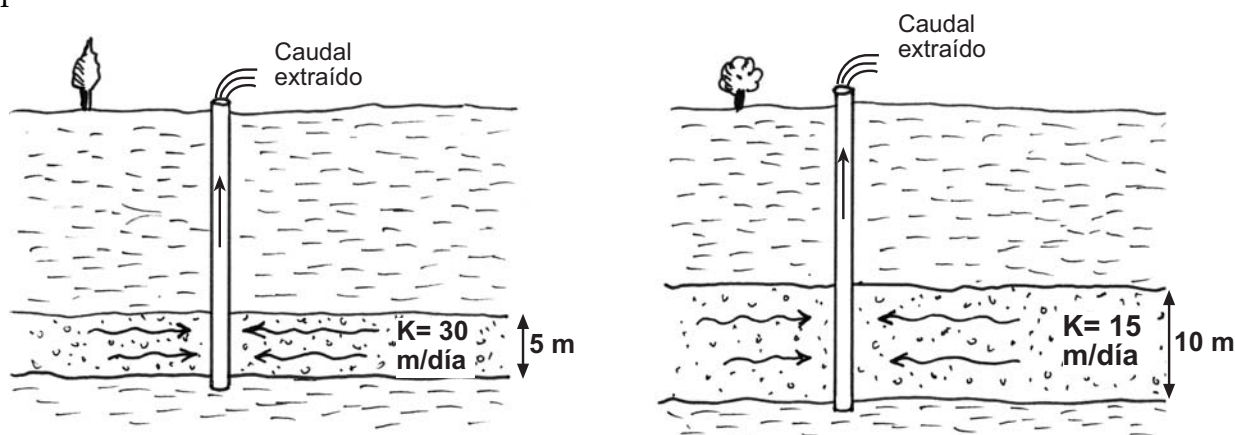
El caudal que atraviesa el medio poroso perpendicularmente a la sección señalada es **linealmente** proporcional al gradiente $\Delta h / \Delta l$

Veremos esto en detalle más adelante. Baste aquí comprender que el gradiente es como la pendiente que obliga a una bola rodar por un plano inclinado. En este caso, obliga al agua a circular a través del medio poroso, y, lógicamente, a mayor gradiente, circulará mayor caudal.

La ecuación anterior es la Ley de Darcy, y la citamos aquí sólo para definir el concepto de permeabilidad (o *conductividad hidráulica*) y obtener sus unidades: despejando en la fórmula anterior se comprueba que las unidades de **K** son las de una velocidad (L/T). En el Sistema Internacional serían **m/seg.**, pero para manejar números más cómodos, por tradición se continúa utilizando **metros/día**. En Geotecnia y otras ramas de ingeniería se utiliza el **cm/s**.

Transmisividad

Si observamos el dibujo intuimos que los dos estratos acuíferos deben proporcionar el mismo caudal: la conductividad hidráulica del derecho es la mitad que el izquierdo, pero su espesor es el doble.



Efectivamente, el parámetro que nos indica la facilidad del agua para circular horizontalmente por una formación geológica es una combinación de la Conductividad Hidráulica y del espesor:

$$\text{Transmisividad} = \text{Conductividad hidráulica} \cdot \text{Espesor}$$

Como las unidades de la Conductividad Hidráulica son L/T y las del espesor L, las unidades de la Transmisividad serán L²/T. Por ejemplo: m²/día, o cm²/seg.

En el ejemplo mostrado en el dibujo anterior, la transmisividad en ambos casos sería de 150 m²/día.

- La transmisividad es variable en acuíferos libres:
- En un confinado su espesor es constante, luego la Transmisividad también es constante.
- En un acuífero libre su *espesor saturado* varía con las oscilaciones de la superficie freática (por ejemplo, invierno-verano), con lo que varía también su transmisividad.

Resumen

La personalidad hidrogeológica de cualquier roca o formación geológica está definida por dos factores:

- Su capacidad de almacén , de almacenar agua y cederla después (porosidad eficaz, coeficiente almacenamiento)	- Su cualidad de transmisor , de permitir que el agua circule a través de ella (permeabilidad, transmisividad)
---	---

Por tanto, la calidad de un acuífero está determinada por su transmisividad y por su coeficiente de almacenamiento (o porosidad eficaz si es libre)

Relacionándolo con los conceptos básicos del primer apartado:

	Porosidad total	Permeabilidad
Acuíferos	Alta o moderada	Alta
Acuitardos	Alta o moderada	Baja
Acuicludos	Alta	Nula
Acuífugos	Nula o muy baja	Nula

Bibliografía (no citada en la web)

- Conckling (1934).- *Ventura County Investigation*. Bulletin nº 16, Division of Water Resources, California, 244 pp. https://openlibrary.org/works/OL7645771W/Mojave_River_investigation
- Eckis, R. (1934).- *South Coastal Basin Investigation*. Bulletin nº 45, Division of Water Resources, California, 279 pp. https://openlibrary.org/works/OL13790428W/South_Coastal_Basin_investigation
- Johnson, A.I. (1967).- Specific Yield. Compilation of Specific Yields for various materials. *Geological Survey Water Supply Paper* 1662-D, v+74 pp. <http://goo.gl/SykEU>
- Needham, J. (1970).- *Clerks and craftsmen in China and the West*. Cambridge University Press, 445 pp.
- Odong, J. (2007).- Evaluation of Empirical Formulae for Determination of Hydraulic Conductivity based on Grain-Size Analysis. *Journal of American Science*, **3(3)**: 54-62.
- Stephens, D.B.; K. Hsu; M.A. Prieksat; M.D. Ankeny; N. Blandford; T.L. Roth; J.A. Kelsey; J.R. Whitworth (1998).- A comparison of estimated and calculated effective porosity. *Hydrogeology Journal*, **6**: 156-165