

Conceptos Fundamentales de Hidrogeología

Clasificación de las formaciones geológicas según su comportamiento hidrogeológico

Acuífero (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 (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 (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 (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 entra 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.

Porosidad total y eficaz

Porosidad total:

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

Puede expresarse en % ó 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:

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

Se expresa igual que la porosidad total (% ó en tanto por 1).

Retención específica: Diferencia entre los dos parámetros anteriores.

Ejemplo:

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 recogieramos 160 litros. Evidentemente los 120 litros que faltan se han quedado mojando los granos.

Con estos datos podemos calcular:

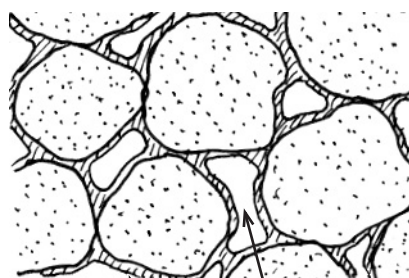
$$1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ dm}^3 \approx 1000 \text{ litros}$$

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

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

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

La definición de *porosidad eficaz* no es tan simple como se indica más arriba. Una definición más correcta sería: "el volumen de huecos disponible para el flujo respecto del volumen total". En inglés (americano) coexisten dos conceptos similares que no tienen equivalente en español: *Specific yield* (rendimiento específico) y *effective porosity* (porosidad efectiva):

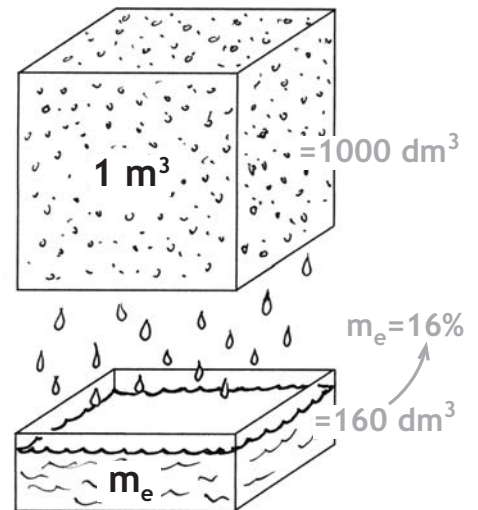


Agua adherida a los granos

Porosidad eficaz: volumen extraíble, sección útil para el flujo

- *Specific yield* (rendimiento específico) nos informa del volumen de **agua que podemos obtener** de un medio poroso saturado.
- *Effective porosity* (porosidad efectiva) se refiere al **volumen de huecos disponible para la circulación del agua**. (En ambos casos respecto del volumen total)

Aproximadamente son equivalentes: el agua que queda adherida a los granos y que no se mueve por gravedad tampoco permite el flujo. En la figura adjunta representamos en rayado el agua adherida a los granos; los huecos que quedan (en el dibujo en blanco) representan tanto el agua extraíble como la sección utilizable por el flujo del agua subterránea. En un laboratorio se puede medir el *specific yield*, pero no existe un método experimental para obtener el valor de la *effective porosity* (la sección utilizada por el flujo).



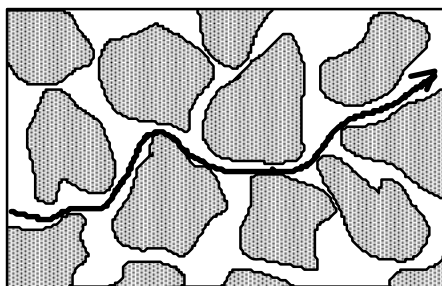
Por todo ello, si disponemos de un valor numérico, generalmente lo asignaremos a ambos conceptos. No obstante, en ocasiones se distinguen: por ejemplo en el modelo de flujo MODFLOW, se solicitan valores de *specific yield* y de *effective porosity*.

En español no se utilizan dos términos distintos, en el uso cotidiano para ambos se dice “porosidad eficaz”, aunque muchos autores han utilizado la expresión “rendimiento específico” .

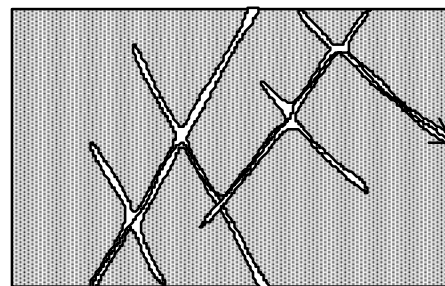
En francés Margat (2000)¹ propone utilizar *porosité de drainage* para el volumen extraíble, y *porosité efficace* o *effective* para la sección disponible al flujo. También señala que diversos autores denominan *porosité effective cinématique* o *porosité effective dynamique* a la relacionada con los huecos disponibles para el flujo.

Porosidad primaria y secundaria

Al hablar de porosidad, intuitivamente se piensa en los poros de un material detrítico, pero las rocas compactas también pueden contener cierta



Porosidad intergranular



Porosidad por fracturación

proporción de agua en su interior en sus fisuras. 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). 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.

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: una arenisca presenta porosidad primaria entre los granos y porosidad secundaria a través de las fracturas u otros planos de discontinuidad de la roca.

La porosidad por fisuración se presenta a escalas muy diversas: el dibujo de arriba podría representar fisuras a escala 1:1, o bien estar representando una realidad con longitud de kilónetros

Factores

En el caso de la porosidad intergranular, la porosidad total no depende del tamaño de grano (piénsese que el % 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.

¹ *Dictionnaire français d'hydrologie*. Comité National Français des Sciences Hydrologiques.
<http://www.cig.ensmp.fr/~hubert/glu/indexdic.htm>

Tanto la 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

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 eventual disolución de la fractura o, en sentido contrario, la colmatación por minerales arcillosos o precipitación de otros minerales.

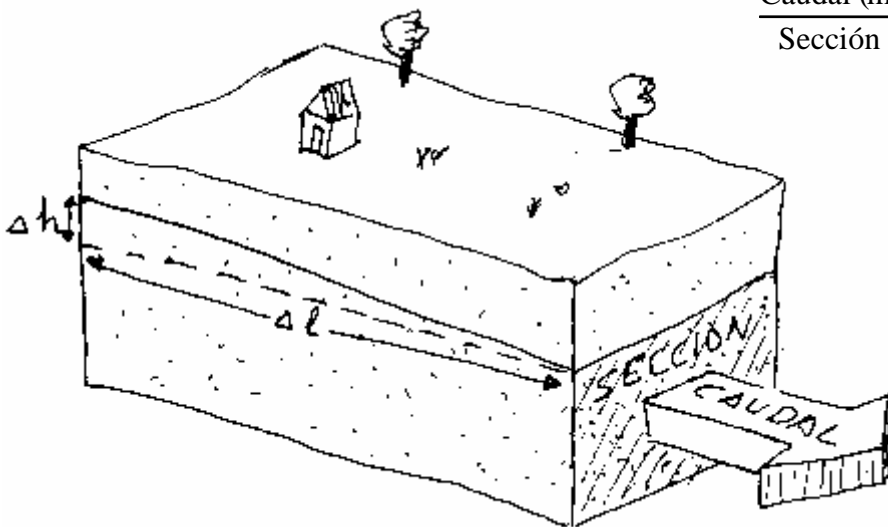
Permeabilidad y transmisividad

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:

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

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



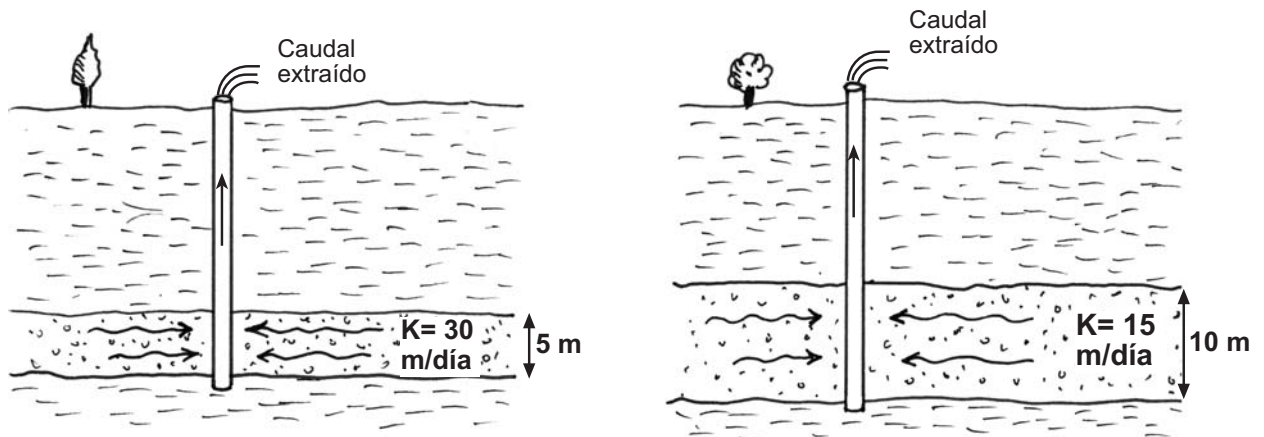
El caudal que atraviesa el medio poroso perpendicularmente a la sección señalada es **linealmente** proporcional al gradiente $\Delta h / \Delta l$

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. Aquí 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 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/seg.**

Transmisividad

Si observamos el dibujo intuimos que los dos estratos acuíferos deben proporcionar el mismo caudal: uno tiene la mitad de permeabilidad, pero el doble de espesor que el otro.



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

$$\text{Transmisividad} = \text{Permeabilidad} \times \text{Espesor}$$

Como las unidades de la permeabilidad 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

Tipos de acuíferos: libres y confinados

En los **acuíferos libres** el agua se encuentra rellenando los poros o fisuras por gravedad, igual que el agua de una piscina llena el recipiente que la contiene. La superficie hasta donde llega el agua se denomina **superficie freática**; cuando esta superficie es cortada por un pozo se habla del **nivel freático** en ese punto.

En los acuíferos libres se habla de **espesor saturado**, que será menor o igual que el espesor del estrato o formación geológica correspondiente. (Figura página siguiente)

En los **acuíferos confinados** el agua se encuentra a presión, de modo que si extraemos agua de él, ningún poro se vacía, sólo disminuye la presión del agua y en menor medida la de la matriz sólida.

Al disminuir la presión del agua, que colaboraba con la matriz sólida en la sustentación de todos los materiales suprayacentes, pueden llegar a producirse asentamientos y **subsistencia** del terreno.

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

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 el plano 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.

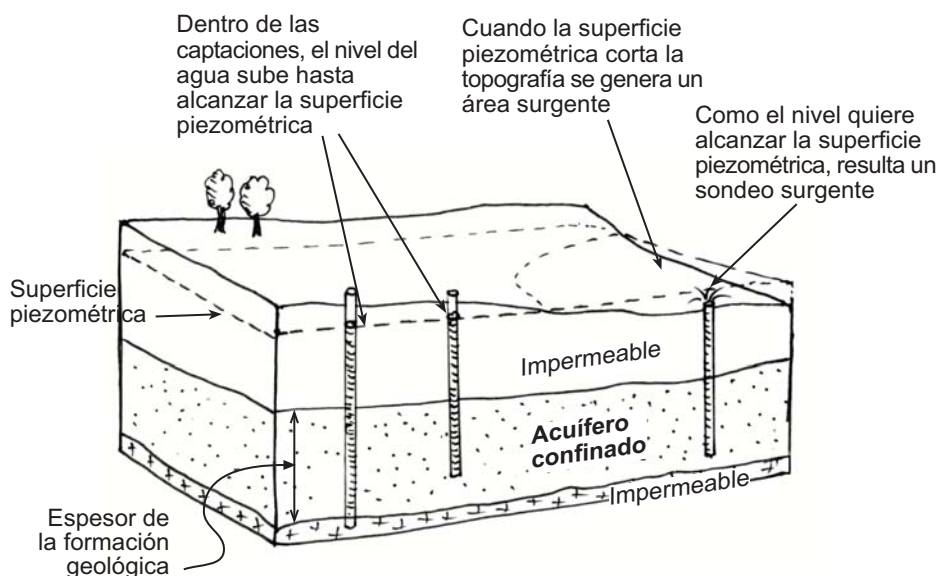
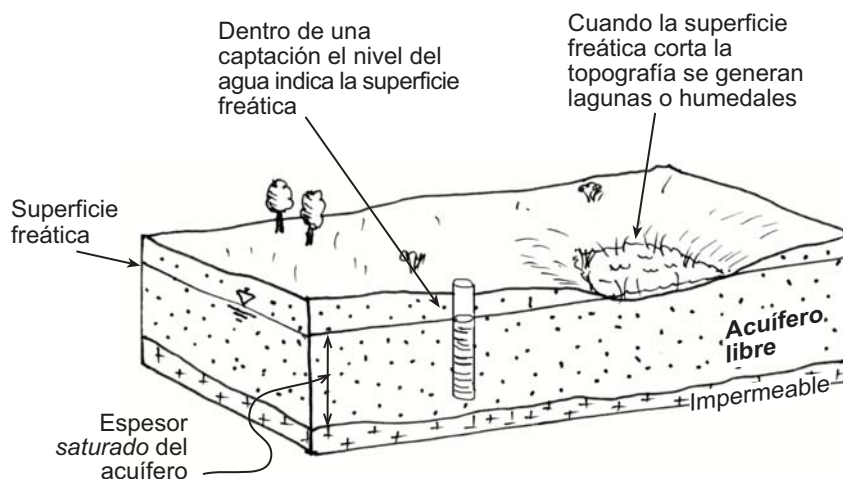
Cuando la superficie piezométrica está por encima de la superficie topográfica, se producen los **sondeos surgentes**. "Artesianos" es una denominación antigua, se refiere a la región de Artois,

Francia, donde el siglo XIX se obtuvieron caudales surgentes espectaculares; entonces no existían bombas capaces de extraer agua de niveles profundos, de modo que la surgencia era el único modo de aprovechar el agua subterránea que estuviera más profunda que unos pocos metros.

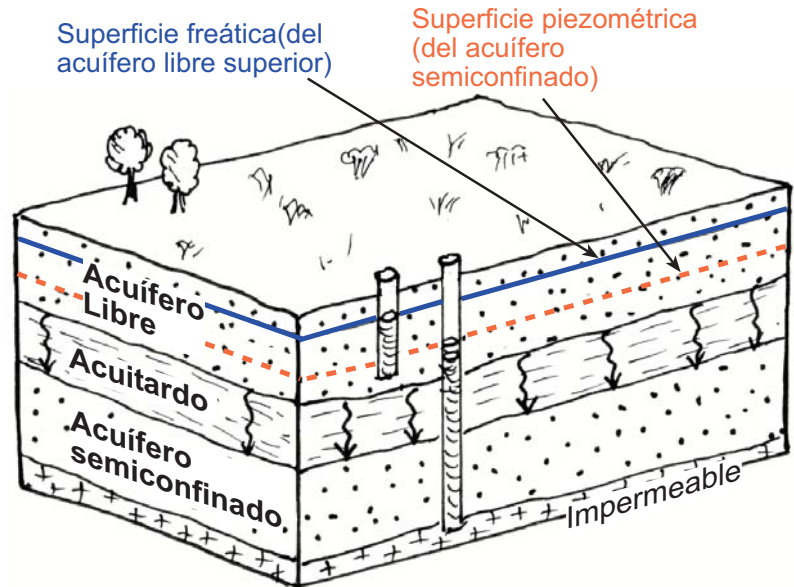
La surgencia no es un indicador de la productividad de la captación: un sondeo surgente al ser bombeado puede proporcionar un caudal mínimo que lo haga inexplorable. La surgencia refleja la altura de la presión del agua (veremos

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**. 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: *leaky aquifers*)



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 mas 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.

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, 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.

Coeficiente de almacenamiento (S) es el volumen de agua liberado por una columna de base unidad y de altura todo el espesor del acuífero cuando el nivel piezométrico desciende una unidad.²

En la figura (a) se representa el concepto: en una columna de 1 m² de acuífero, la superficie piezométrica ha descendido 1 metro al extraer un volumen S.

Es evidente que el concepto de *porosidad eficaz* encaja perfectamente en la definición de coeficiente de almacenamiento (figura b): si consideramos 1 m² de acuífero libre y hacemos

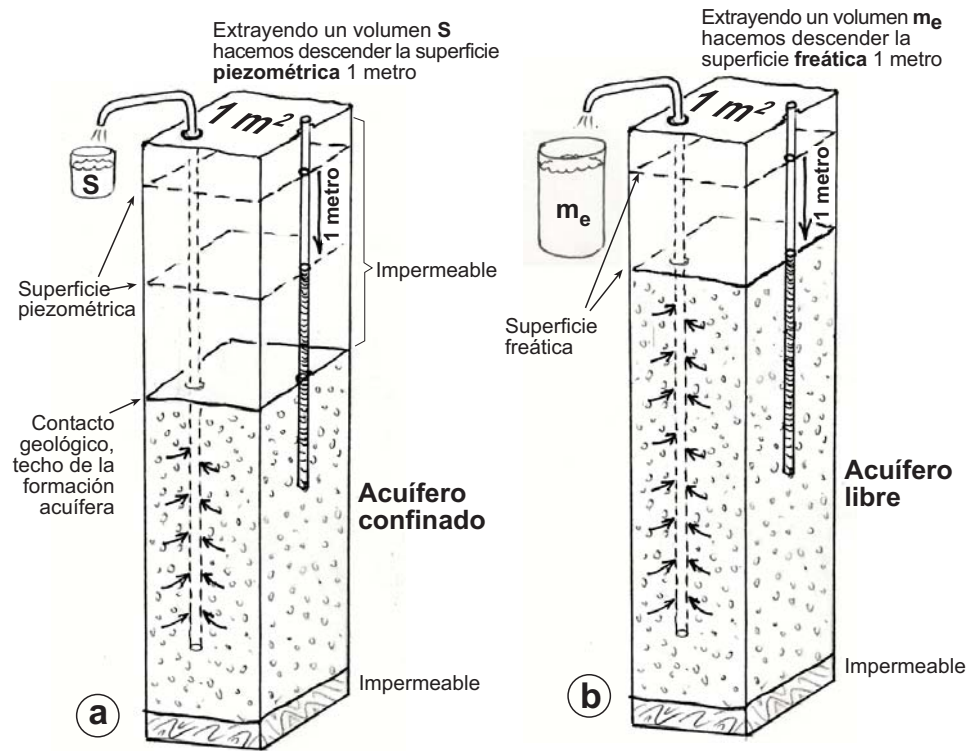
² No es necesario hablar de 1 m² y 1 m de descenso. La definición correcta sería:

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

Con la definición más didáctica que enunciamos arriba, el denominador de la expresión anterior es 1 m³ y por tanto, el valor de S es igual al volumen de agua liberado expresado en m³.

descender 1 metro su superficie freática el volumen de agua que habremos extraído será la porosidad eficaz (m_e).

El acuífero libre nos proporciona el volumen m_e por vaciado del m^3 superior (el volumen que aparece en el dibujo entre las dos posiciones de la superficie freática), mientras que en el acuífero cautivo, cuando el nivel desciende 1 m, es toda la columna de acuífero que aporta el volumen de agua S .³



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: 0,3 a 0,01 ($3 \cdot 10^{-1}$ a 10^{-2})

Acuíferos semiconfinados: 10^{-3} a 10^{-4}

Acuíferos confinados: 10^{-4} a 10^{-5}

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)

Recordando 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

³ El coeficiente de almacenamiento es en inglés *Storativity* (S). Un concepto distinto es *Specific Storage* (S_s) ("Almacenamiento específico") que es el volumen liberado por 1 m^3 de acuífero (no por toda la columna de acuífero) al descender 1 metro la superficie piezométrica. Se utiliza, por ejemplo en MODFLOW.