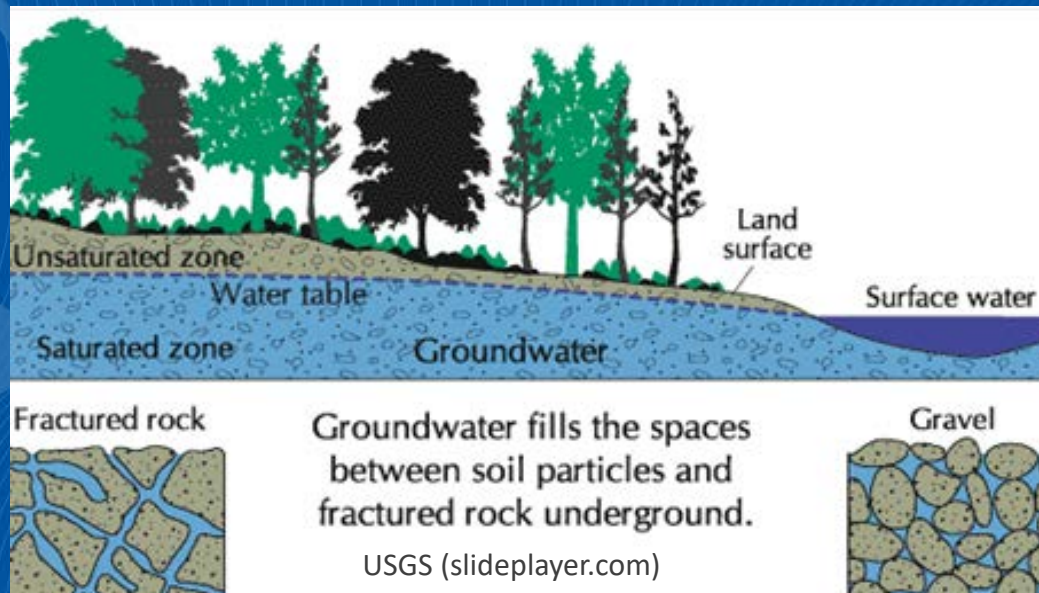


# Mecánica Avanzada de Suelos

## MCieTAT (UPCT)



## Tema 2

# La presencia de agua en el terreno



# ÍNDICE

**Introducción**

**Nociones básicas**

**El concepto de esfuerzo efectivo**

**Carga total. Teorema Bernouilli**

**El agua en reposo. Presiones hidrostáticas**

**Piezometría. Hidrostática**

**Piezometría. Hidrodinámica**

**Líneas equipotenciales**

**Líneas de flujo**

**Gradiente hidráulico y Ley de Darcy**

**Conductividad hidráulica**

**Referencias**



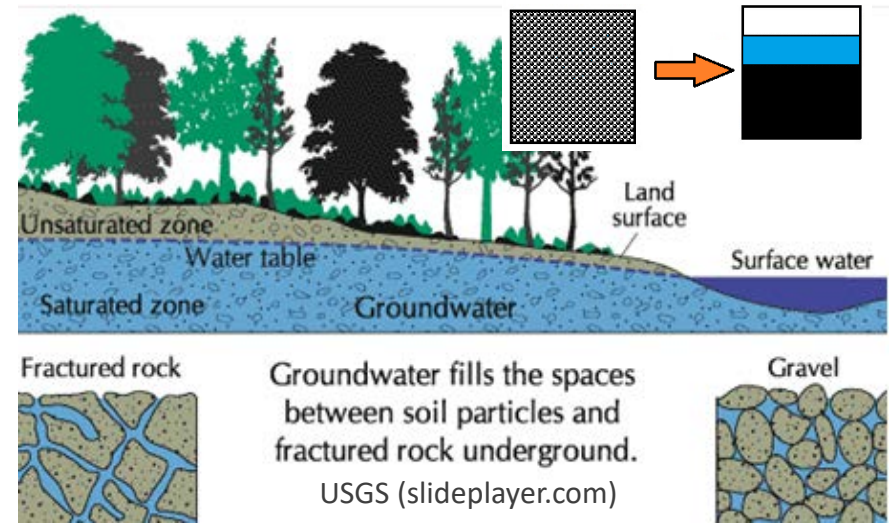
## Introducción

La mayor parte de las rocas, suelos o sedimentos presentan poros o fracturas que pueden ser ocupados por agua o aire.

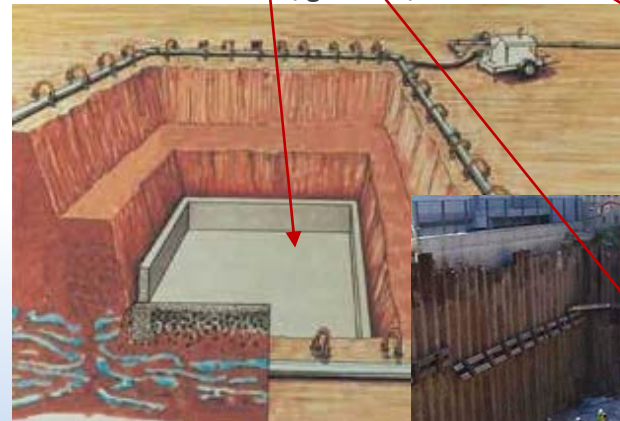
El agua puede circular por los poros del suelo según un campo de potenciales (niveles de energía).

Conocer el volumen/tiempo de agua que circula por el terreno es importante en geotecnia para :

- Calcular la cantidad de agua que circula bajo una estructura (p.e. presa).
- Calcular el abatimiento del nivel freático\* en excavaciones.
- Prever efectos de sifonamiento y tubificación.



[diesa-mx.com/goldwin/index.htm](http://diesa-mx.com/goldwin/index.htm)



[victorypes.blogs.upv.es](http://victorypes.blogs.upv.es)

[ajitvadakayil.blogspot.com](http://ajitvadakayil.blogspot.com)



\*conjunto de operaciones destinadas a la evacuación de las aguas freáticas presentes en el terreno y que irrumpen en las zonas donde estamos trabajando

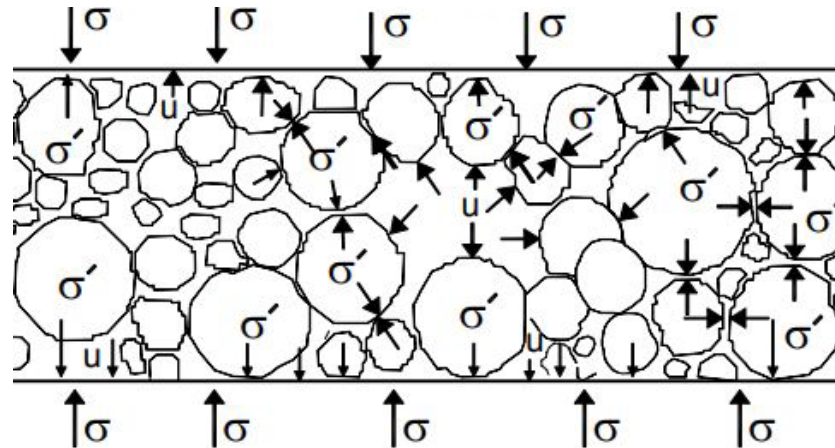


Definimos:

$\sigma$  = esfuerzo o tensión total (kPa)

$u$  = presión intersticial (kPa)

$\sigma'$  = esfuerzo o tensión efectiva (kPa)



$$\sigma' = \sigma - u$$

ingeotec.blogspot.com

### **Principio de tensiones efectivas.** $\sigma' = \sigma - u$

Si los poros de un suelo se encuentran rellenos de agua, bajo una presión  $u$ , la **tensión total ( $\sigma$ )** a la que se encuentra sometido dicho suelo **se compone de dos partes.**

- 1) Una parte,  $u$ , conocida como **presión intersticial**, o presión de poro, **actúa sobre el agua y sobre las partículas sólidas** en todas direcciones y con igual intensidad.
- 2) La diferencia,  $\sigma' = \sigma - u$ , representa un exceso de presión sobre la presión intersticial  $u$ , y **actúa exclusivamente en la fase sólida del suelo**. Esta fracción de la tensión total se denomina **tensión efectiva**.

### **IMPORTANTE**

**Cualquier efecto medible debido a un cambio de tensiones**, tal como la compresión, la distorsión o la modificación de la resistencia al corte de un suelo, **es debido exclusivamente a cambios en las tensiones efectivas.**



En los problemas de flujo, la forma de expresar la energía en un determinado punto del fluido en movimiento se define a partir del llamado **Teorema de Bernoulli**:

$$H = z + \frac{u}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g}$$

Donde **H** es la **carga hidráulica total** (m), que se descompone en tres sumandos (trinomio de Bernoulli):

**z** = **altura geométrica** (m). Es común referirse este término como **z**.

**u/γ<sub>w</sub>** = **altura de presión** (m). Es común referirse este término como **h<sub>p</sub>**.

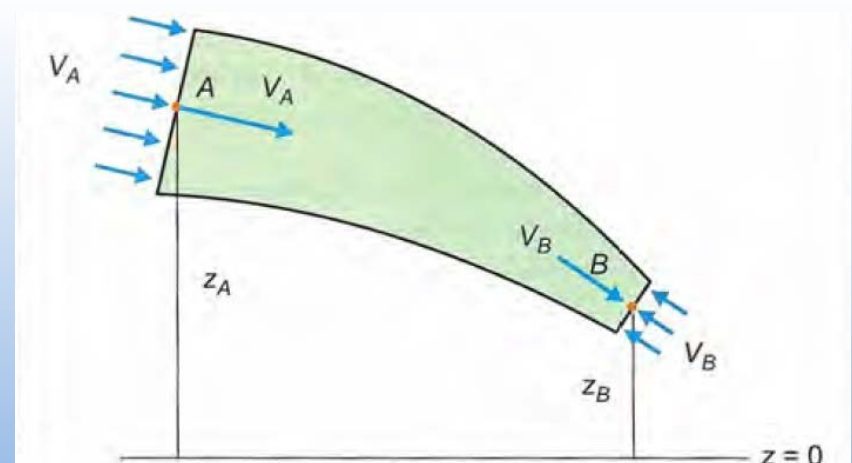
**v<sup>2</sup>/2g** = **altura de velocidad** (m)

Los dos primeros términos representan una energía de posición (potencial), mientras que el tercer término corresponde a una energía cinética.

En el **caso de un fluido perfecto, incompresible** y sujeto a un **flujo permanente y estacionario**, la **carga hidráulica total se mantiene constante**.

Por tanto, entre dos puntos cualesquiera, la energía global dada por la carga H se mantiene invariable, transfiriéndose dicha energía de unos términos a otros.

$$z_A + \frac{u_A}{\gamma_w} + \frac{v_A^2}{2g} = z_B + \frac{u_B}{\gamma_w} + \frac{v_B^2}{2g}$$





## El agua en reposo. Presiones hidrostáticas

Un **caso particular y muy habitual** de mantenimiento de la carga total corresponde a situaciones en las que el **agua está en reposo**.

En estos casos, al ser nula\* la velocidad de flujo, el **Teorema de Bernouilli queda reducido a un binomio**:

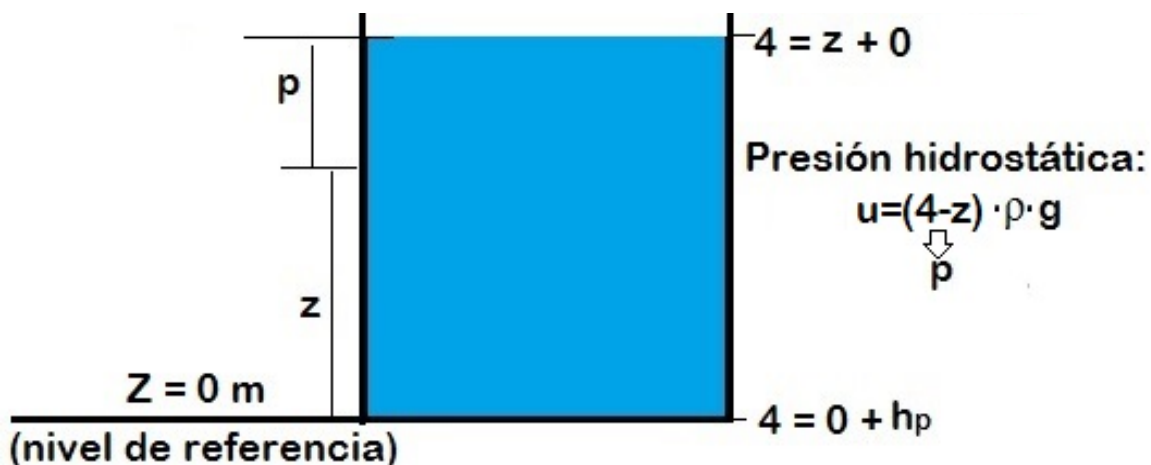
$$H = z + \frac{u}{\gamma_w}$$

\* Para los casos de flujo en medios porosos, la velocidad nunca supera los 0.6 m/min, de forma que el término  $v^2/2g$  se puede considerar despreciable frente a los otros dos.

**Hidrostática** ( $H = cte$ )

$H = cte$ : sin pérdidas de carga

¿Hay movimiento del agua en el seno de la piscina? Conforme evaluamos  $z$  y  $h_p$  en distintos puntos en la piscina, **el cambio de altura geométrica es compensado por un aumento o disminución de la presión**, de forma que  $h$  se mantiene constante en cualquier punto → **no hay movimiento**





La **piezometría** (carga hidráulica=altura piezométrica=nivel piezométrico) mide el **nivel de energía mecánica** que presenta un diferencial de volumen de **agua en un punto del medio poroso**.

- Se representa con el **símbolo h** y se mide en **unidades de longitud** (metros).

- **Su valor** en un punto corresponde con la **altura máxima** (en contacto con el aire a presión atmosférica) **que alcanza el agua en un piezómetro** colocado en ese punto. Se mide respecto a un sistema de referencia absoluto.

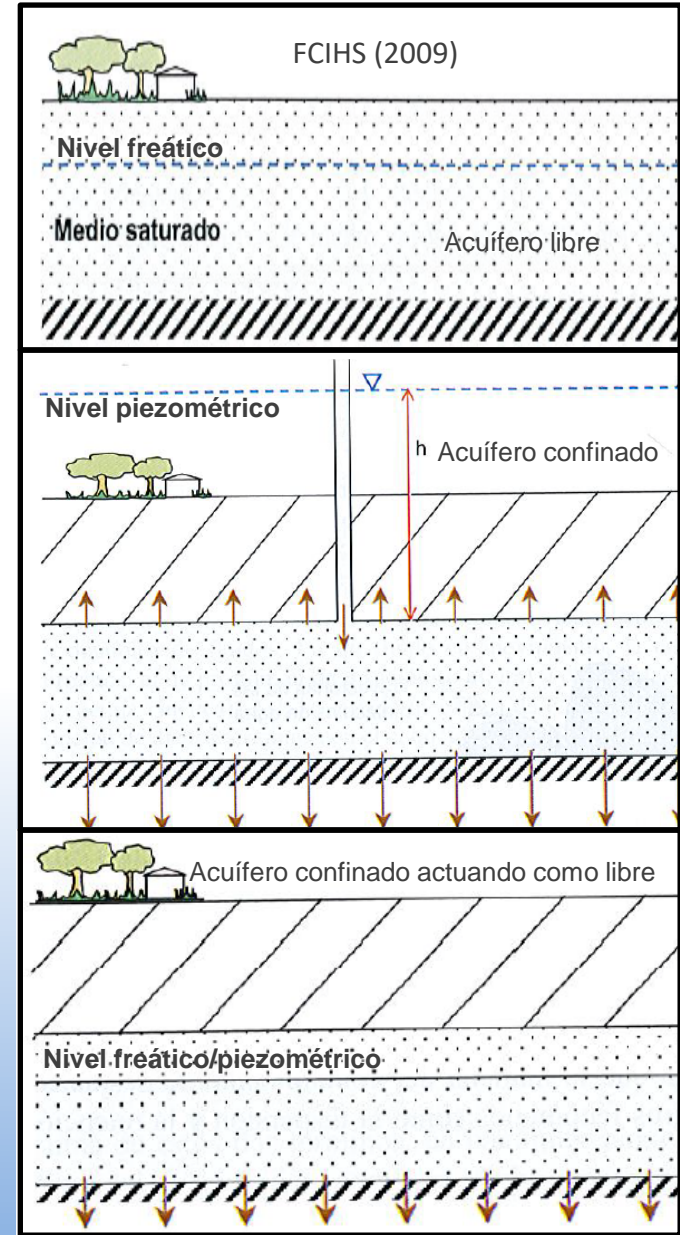
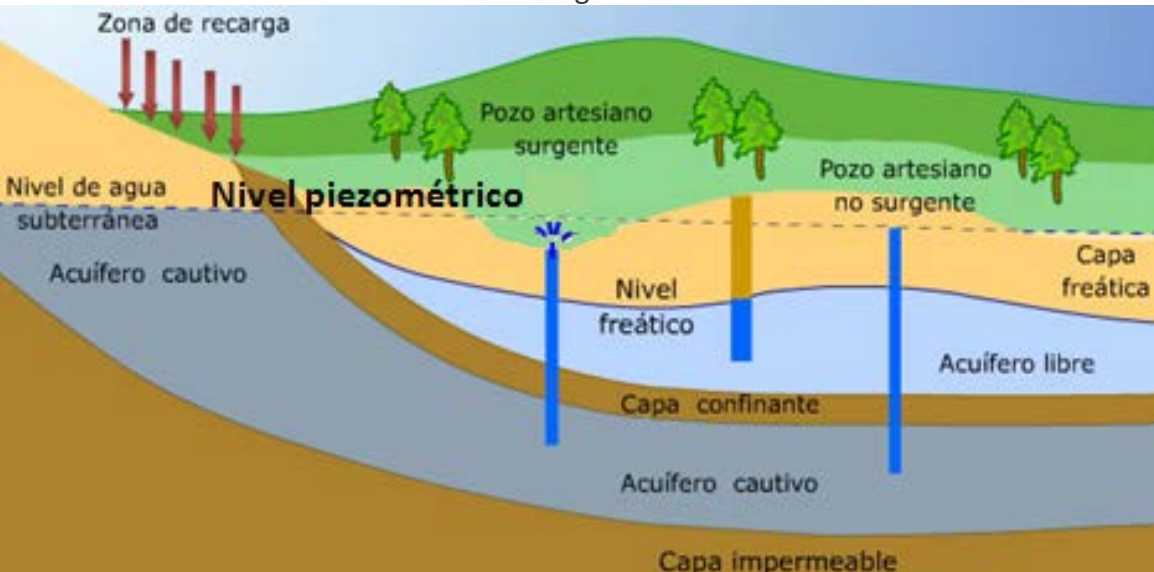
- **Distinguimos nivel freático (acuíferos libres**, donde la superficie del agua está en contacto con el aire) y **nivel piezométrico (acuíferos confinados, donde la superficie superior del agua está en contacto con materiales impermeables y a presión superior a la atmosférica, por lo que no refleja la piezometría: → nivel piezométrico virtual)**.

- El valor de h se obtiene a partir de la expresión:

$$h = z + \frac{u}{\gamma_w}$$

donde u es la presión intersticial (N/m<sup>2</sup>) y z la posición (m)

diccionario.geotecnia.online





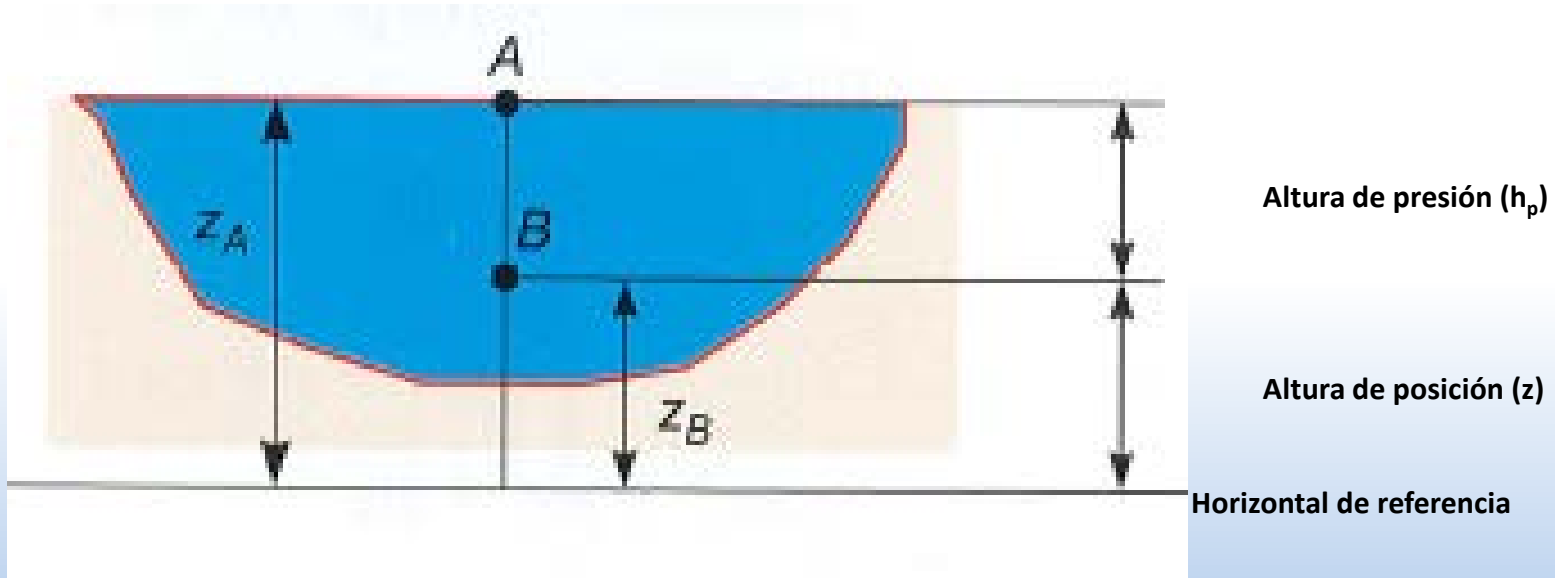
El Nivel Piezométrico (NP) es un punto de un acuífero es la altura que alcanza el agua, sobre una horizontal de referencia, cuando se deja éste a la presión atmosférica.

$$H = z + \frac{u}{\gamma_w}$$

Se compone de dos sumandos:

**z = altura geométrica o de posición (m).** Es común referirse este término como **z**.

**$u/\gamma_w$  = altura de presión (m).** Es común referirse este término como  **$h_p$** .



González de Vallejo et al. (2002)





**Piezometría**

**Hidrodinámica**

**$\Delta h \neq 0$**

### Pérdidas de carga

**$\Delta h \neq 0$**

Los **fluidos reales**, como el agua, **presentan viscosidad**, de forma que **en su desplazamiento pierden energía por rozamiento interno** al encontrar obstáculos (los granos del medio poroso). La **diferencia de  $h$  entre dos puntos mide la pérdida de energía mecánica del agua al ir de uno a otro**.

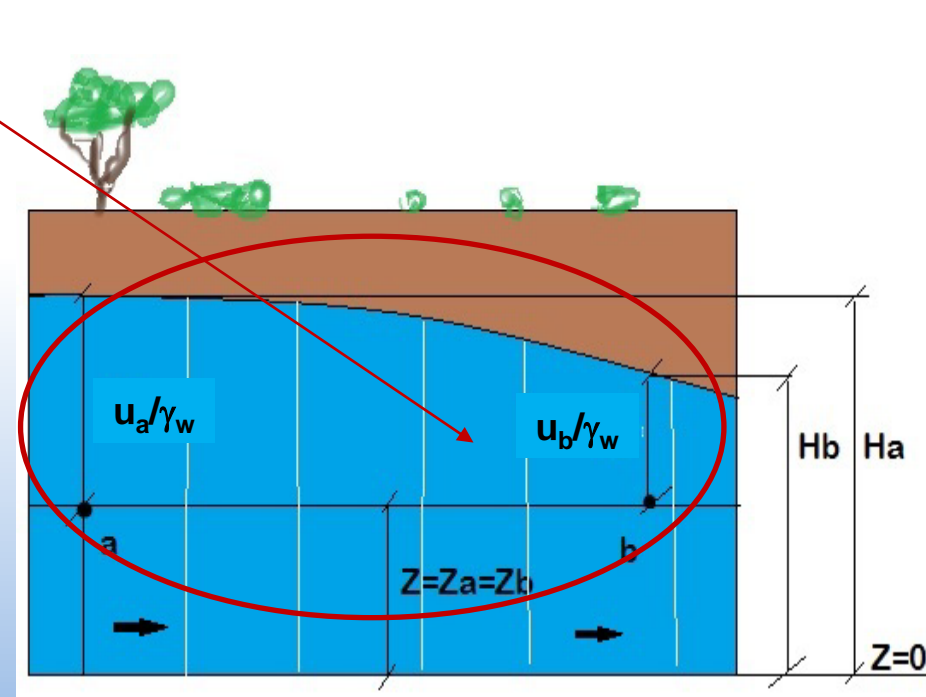
### Movimiento del agua en el subsuelo

**El agua se mueve de puntos con mayor  $h$  a puntos con menor  $h$** , dentro de un campo de potenciales piezométricos (símil campo gravitatorio)

#### **Ejemplo:**

En la figura de la derecha se ha simplificado el problema representando las equipotenciales verticales (en realidad deberían ser perpendiculares a la superficie freática, como veremos más adelante) con líneas en blanco.

Según esta disposición, el agua se desplaza hacia la derecha. Podemos ver que para dos puntos  $a$  y  $b$  con igual  $Z$ , el cambio de  $h$  es debido al cambio de presión  $u_a - u_b$  (en  $b$  hay menos columna de agua por encima).





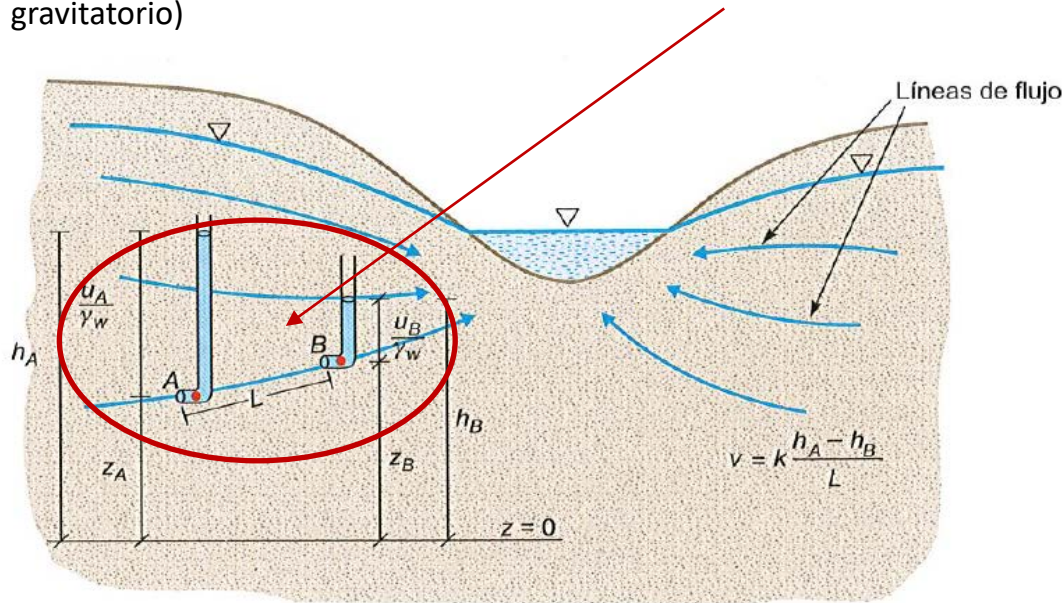
Pérdidas de carga

$\Delta h \neq 0$

Los **fluidos reales**, como el agua, **presentan viscosidad**, de forma que **en su desplazamiento pierden energía por rozamiento interno** al encontrar obstáculos (los granos del medio poroso). La diferencia de h entre dos puntos mide la pérdida de energía mecánica del agua al ir de uno a otro.

Movimiento del agua en el subsuelo

El agua se mueve de puntos con mayor h a puntos con menor h, dentro de un campo de potenciales piezométricos (símil campo gravitatorio)



González de Vallejo et al. (2002)

$h_A > h_B \Rightarrow$  Flujo de A hacia B

**Ejemplo:**

En la figura de la izquierda se ven los **cambios que se producen en h,  $u/\gamma_w$  y z** a lo largo de una **línea de flujo** entre dos puntos.

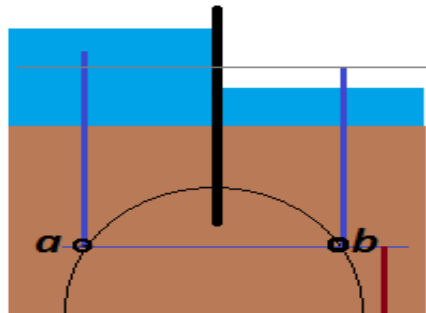
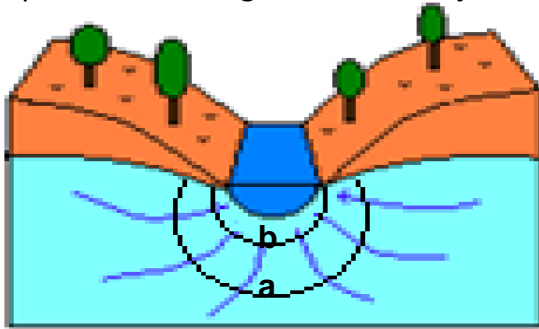
Lo que **determina** finalmente el **sentido del flujo** es el valor de h.

**El punto B se encuentra por encima del punto A**, por lo que intuitivamente cabría esperar que **en B la energía total fuera mayor** (si pensamos en términos de potencial gravitatorio), o por lo menos igual, **cosa que no ocurre.**

**NOTA:** fíjate en cómo **la presión en el punto A equivale a la columna de agua que asciende por el piezómetro**, NO al nivel freático que en la vertical de A se encuentra próximo a superficie



En la figura inferior se ve como, pese a que el punto b tiene mayor energía de posición (z) que el punto a, la **disminución de potencial (h) entre a y b** es lo suficientemente grande como para que  **$\Delta h$  sea negativo en sentido ascendente y el agua descargue hacia el río** (valor del potencial en negro, línea de flujo en azul)



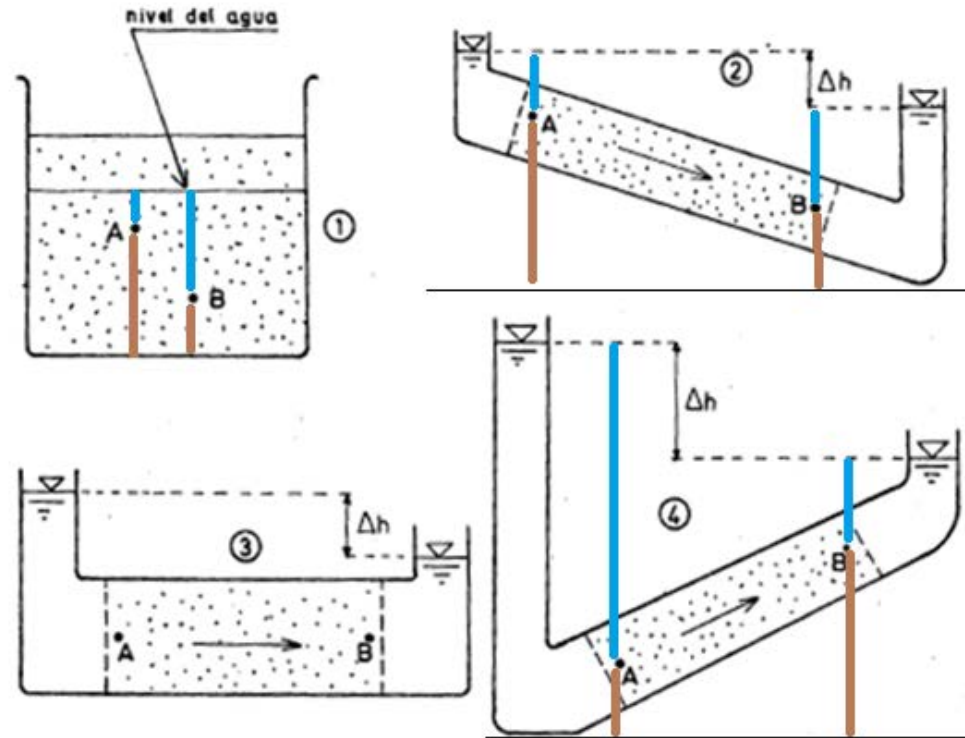
$h_{pa} > h_{pb}$ , pese a encontrarse a la misma profundidad.  $z_a < z_b$

Recuerda:  $(h_p = u/\gamma_w)$

El agua se desplaza de a hacia b.

**NOTA:** el nivel piezométrico o freático fuera del medio poroso nunca varía. Consideramos que el fluido es ideal y que no se produce pérdida de energía al circular fuera del medio poroso. Por tanto las variaciones de h se producen solamente al atravesar el medio poroso

Custodio y Llamas (1976)



*Ilustración del principio de que el agua se mueve de puntos de mayor nivel piezométrico a puntos de nivel piezométrico menor y no necesariamente de puntos de mayor presión a puntos de menor presión.*

1. Nivel piezométrico constante; el agua está estacionaria a pesar de ser  $p_A < p_B$

2.  $h_A > h_B$  y  $p_A < p_B$

3.  $h_A > h_B$  y  $p_A = p_B$

4.  $h_A > h_B$  y  $p_A > p_B$

**Blue line:  $p = h_p$  (en esta figura)**

**Brown line:  $Z$**

**El cambio de presión por sí solo no explica el movimiento**

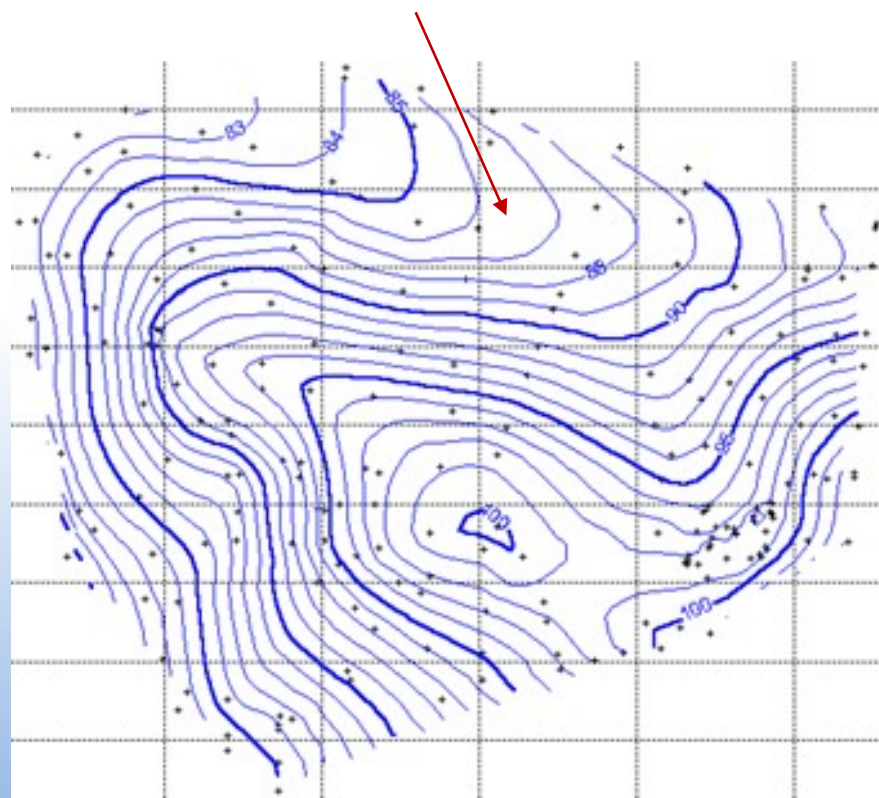


## Lineas equipotenciales

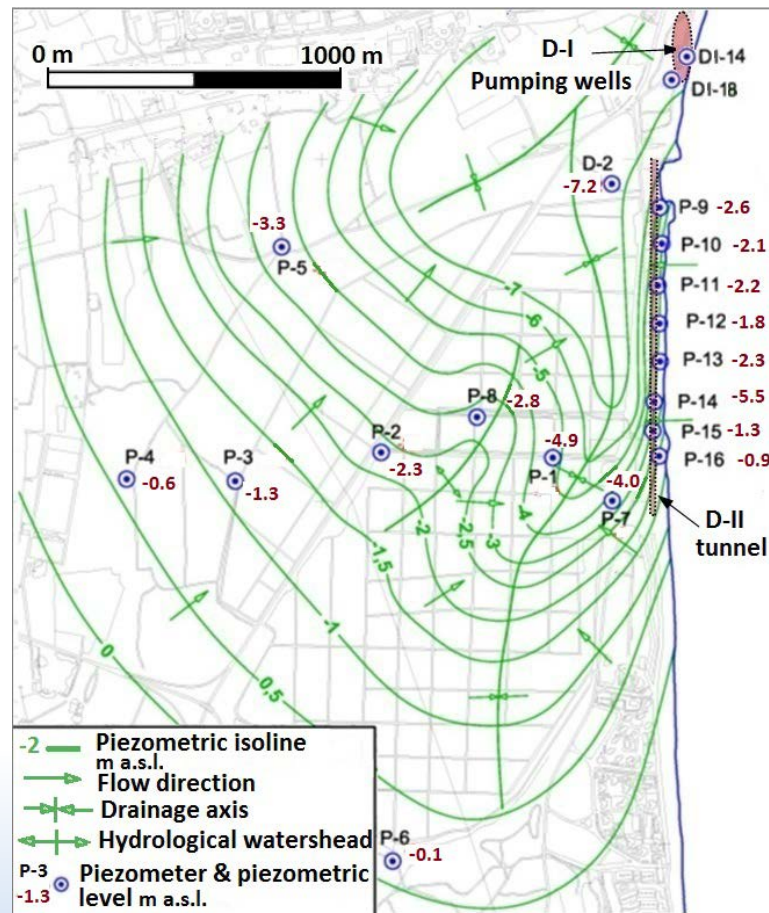
**Línea equipotencial** (equipotenciales=isopotenciales): son las líneas (o superficies para tres dimensiones) que unen los puntos de igual potencial hidráulico ( $h$ ). En todos los piezómetros que se coloquen en un misma equipotencial, el agua alcanzará la misma altura.

El movimiento de agua en un punto (el vector velocidad) siempre es perpendicular a la superficie equipotencial que pasa por ese punto.

- Símil: movimiento de una masa en un campo gravitatorio.
- Símil: curvas de nivel y línea de máxima pendiente



Alhama (2011)



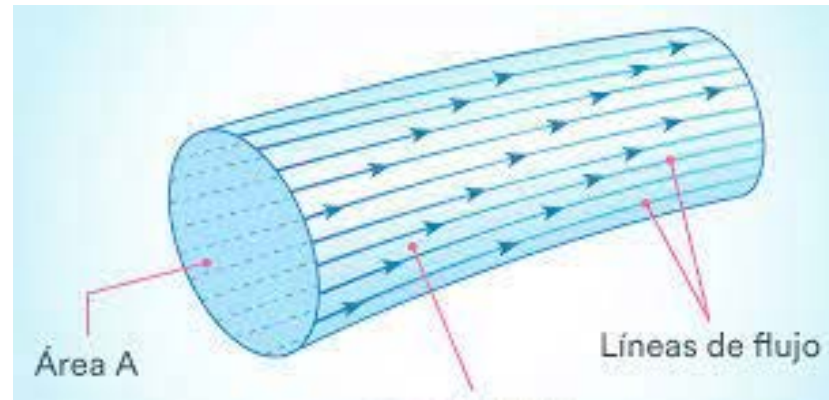
- Un mapa de piezometría representa las “curvas de nivel” de la superficie del agua subterránea. Observa la dirección de flujo del agua subterránea en el mapa de piezometría de la figura de arriba.
- ¿Cuál sería el movimiento de un esfera a lo largo de la superficie del terreno representada en el mapa topográfico de la izquierda? Piensa en el gradiente topográfico.



## Líneas de flujo

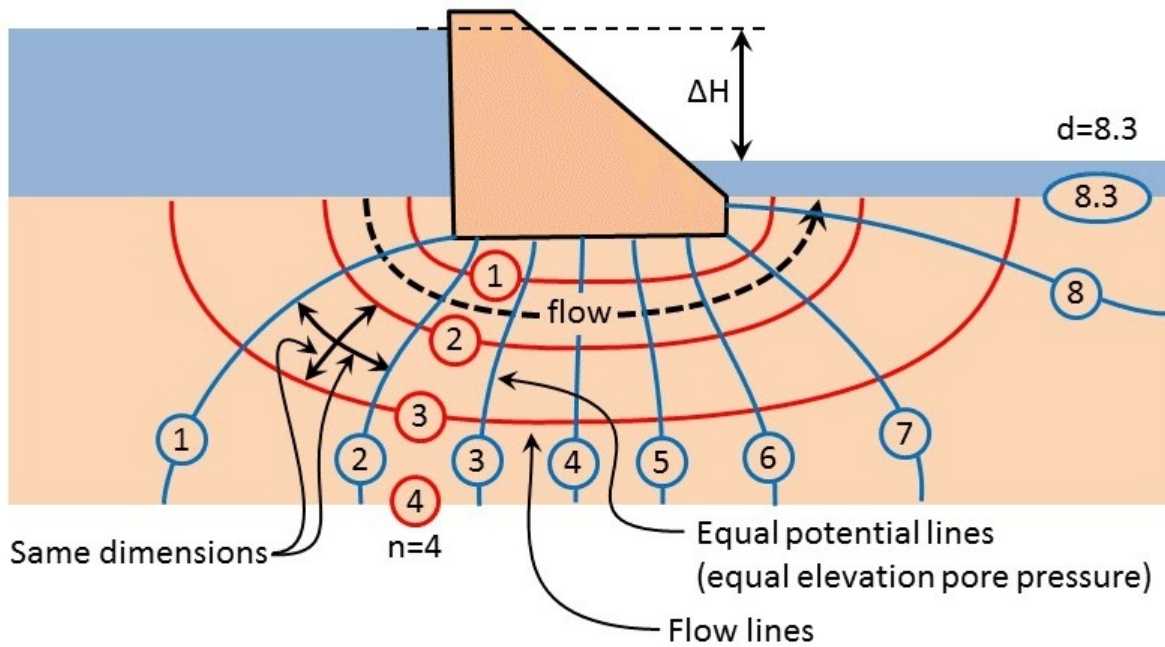
Una línea de flujo representa el trayecto o camino recorrido por una partícula de agua.

Son siempre perpendiculares a las líneas o superficies equipotenciales.



repositoriotec.tec.ac.cr

Dos líneas de flujo se representan de manera que el caudal que pasa entre dos líneas contiguas es siempre constante.



### Equipotenciales en azul

### Líneas de flujo en rojo (1, 2, 3 y 4)

El caudal que pasa entre dos líneas de flujo (tubo de corriente) es el mismo.

De esto se deduce que **por la sección bajo la presa** (por ejemplo, por donde está la equipotencial 4) **el agua circula a más velocidad** (que, por ejemplo, por donde está la equipotencial 8), puesto que hay menos sección para un mismo caudal.

Recuerda: **Caudal = velocidad x sección**



Ilustraciones de algunos tipos de superficies piezométricas sencillas:

TIPO	Cilíndrica plana	Parabólica cilíndrica	Parabólica radial convergente	Hiperbólica radial divergente	Elíptica cilíndrica
PERFIL SEGUN EL FLUJO					
ISOPIEZAS					

Custodio y Llamas (1976)



## Gradiente hidráulico

$$i = \Delta h / l$$

- El **gradiente hidráulico (i)** entre dos puntos de un medio poroso evalúa el **cambio de potencial hidráulico ( $\Delta h$ ) respecto a la distancia (l)** entre los dos puntos

- Una **partícula de agua** en el seno de un medio poroso **se mueve en el sentido en el que el gradiente hidráulico es mayor**

· Símil: una canica que se deja en reposo en un punto de la superficie del terreno, iniciará el movimiento en el sentido en el que el gradiente topográfico o pendiente sea mayor

## Ley de Darcy (1856)

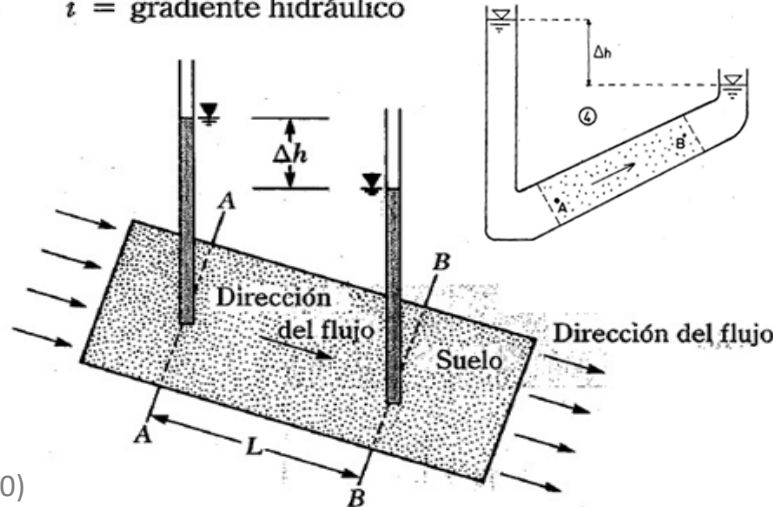
$$v = -k i$$

Es una ecuación experimental que se utiliza para **calcular la velocidad de flujo a través de un medio poroso**

$$v = -ki$$

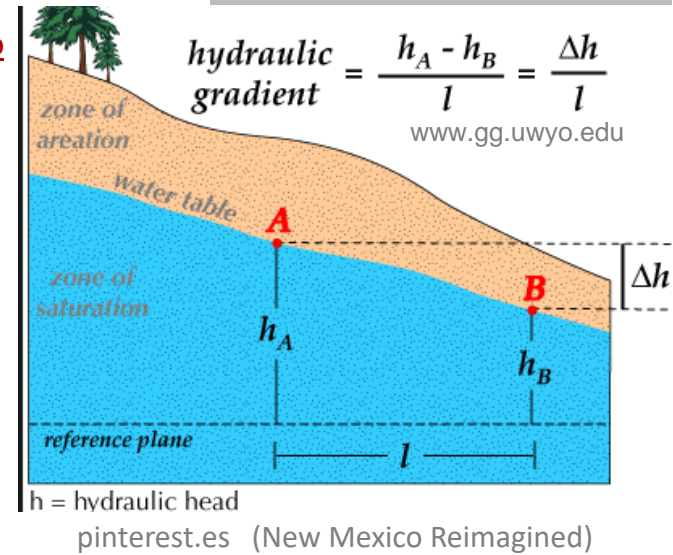
$v$  = velocidad de Darcy  
 $k$  = Conductividad hidráulica del suelo  
 $i$  = gradiente hidráulico

$$i = \frac{\Delta h}{L}$$

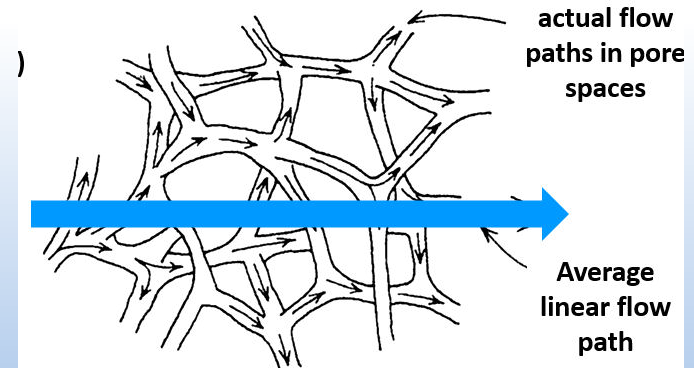


Das (2010)

**NOTA:** También podríamos plantear la ecuación de Darcy con el caudal  $Q = -S k i$



La **velocidad de Darcy ( $v_d$ )** no representa la **velocidad real ( $v_r$ )** de la partícula, sino una **velocidad media**.



books.gw-project.org

Si la **velocidad** de la partícula es tan **elevada** que se alcanza el **régimen turbulento** (gravas o acuíferos fracturados), la **ley de Darcy** no es válida.

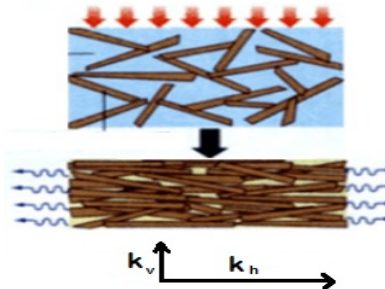


La conductividad hidráulica k:

- mide la **capacidad del terreno para permitir el movimiento del agua** en su seno.
- **depende de las características del terreno y del fluido.**
- tiene **unidades de longitud/tiempo**; m/d, cm/s (las más comunes).
- su valor **no es proporcional a la porosidad** (sólo en terrenos granulares).
- **en la literatura** también aparece como **coeficiente de permeabilidad, permeabilidad, permeabilidad efectiva, permeabilidad de Darcy...**

Nunca permeabilidad intrínseca K

Normalmente los suelos presentan **anisotropía** respecto al valor de k. Para suelos arcillosos el contraste es mayor ( $k_h/k_v$ )>1.5.

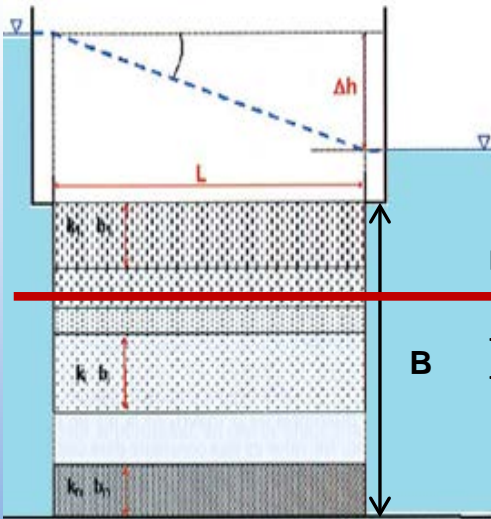


Tipo de suelo	Permeabilidad hidráulica, k (cm/s)
Grava media a gruesa	Mayor que 10 <sup>-1</sup>
Arena gruesa a fina	10 <sup>-1</sup> a 10 <sup>-3</sup>
Arena fina, arena limosa	10 <sup>-3</sup> a 10 <sup>-5</sup>
Limo, limo arcilloso, arcilla limosa	10 <sup>-4</sup> a 10 <sup>-6</sup>
Arcillas	10 <sup>-7</sup> o menor

Berry y Reid (1993)      Das (2010)

Tipo de suelo	Conductividad hidráulica (m/s)
Arcilla	< 10 <sup>-9</sup>
Arcilla arenosa	10 <sup>-9</sup> a 10 <sup>-8</sup>
Limo	10 <sup>-8</sup> a 10 <sup>-7</sup>
Turba	10 <sup>-9</sup> a 10 <sup>-6</sup>
Arena fina	10 <sup>-6</sup> a 10 <sup>-4</sup>
Arena gruesa	10 <sup>-4</sup> a 10 <sup>-3</sup>
Arena gravosa	10 <sup>-3</sup> a 10 <sup>-2</sup>
Grava	> 10 <sup>-2</sup>

Medio no isótropo. Flujo en paralelo

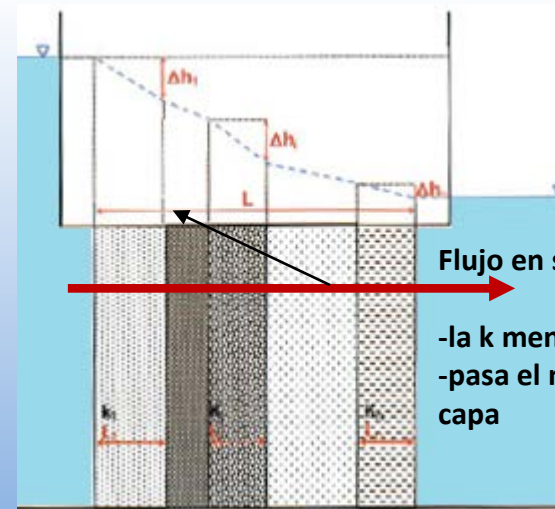


$$k = \frac{\sum b_i \cdot k_i}{B}$$

Flujo en paralelo:

- la k mayor influye sobre la final
- distinto caudal por cada capa

Medio no isótropo. Flujo en serie



$$k = \frac{L}{\sum \frac{l_i}{k_i}}$$

Flujo en serie:

- la k menor influye sobre la final
- pasa el mismo caudal por cada capa





## Referencias

<https://slideplayer.com/slide/15494960/> (USGS)

<http://www.diesa-mx.com/goldwin/index.htm>

<https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/abatimiento-del-nivel-freatico/>

<http://ajitvadakayil.blogspot.com/2018/10/soil-liquefaction-during-earth-quakes.html>

<https://ingeotec.blogspot.com/2018/11/esfuerzos-totales-y-efectivos.html>

González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Pearson Educación.

FCIHS. Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea. (2009)

<https://www.diccionario.geotecnia.online/palabra/nivel-piezometrico/>

Custodio, E. & Llamas, M. R. (1976). *Hidrología subterránea* (Vol. 2). Barcelona: Omega.

Alhama Manteca, I. (2011). *Relaciones hidrogeológicas y medioambientales entre el Mar Mediterráneo, el Saladar y el acuífero de Agua Amarga (provincia de Alicante)*.



## Referencias

<https://slideplayer.es/slide/4585927/> (Elvira Rico Roldán)

<https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/10195/Dinamica%20de%20fluidos%20ideales.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Olsen, R. S., & Stephens, I. J. (2016). *Relearning How to Look at Piezometric Data for Seepage Evaluation*. In *USSD 2016 annual conference*. Denver, USA.

[https://www.researchgate.net/publication/319206472\\_relearning\\_hiw\\_to\\_look\\_at\\_piezometric\\_data\\_for\\_seepage\\_evaluation](https://www.researchgate.net/publication/319206472_relearning_hiw_to_look_at_piezometric_data_for_seepage_evaluation)

Das, B. M. (2010). *Principles of geotechnical engineering*. Cengage learning.

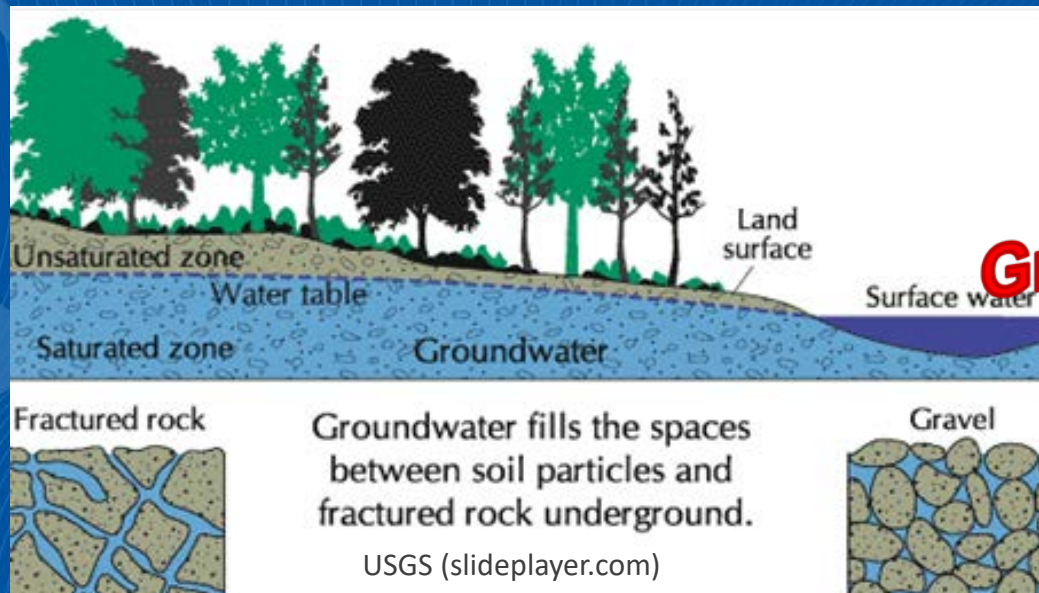
<https://www.pinterest.es/pin/51298883232213920/> (New Mexico Reimagined)

<https://books.gw-project.org/hydrogeologic-properties-of-earth-materials-and-principles-of-groundwater-flow/chapter/darcys-law/>

Berry, P. L., & Reid, D. (1993). *Mecánica de suelos*. McGraw-Hill.

# Mecánica Avanzada de Suelos

## MCieTAT (UPCT)



**Gracias por su atención**

## Tema 2

# La presencia de agua en el terreno