

Modelización analógica del nivel piezométrico y sus implicaciones geotécnicas

Simulation of the piezometric level and its geotechnical implications

JOSÉ NESPEREIRA^{1*}, SERAFÍN MONTERRUBIO¹, BEGOÑA FERNÁNDEZ¹, MARIANO YENES¹ Y JOSÉ ÁNGEL ALONSO²

¹ Departamento de Geología. Escuela Politécnica Superior de Zamora. Universidad de Salamanca. Avenida Cardenal Cisneros 34, 49022 Zamora.

² Escuela Politécnica Superior de Zamora. Universidad de Salamanca. Avenida Cardenal Cisneros 34, 49022 Zamora.

*E-mail: jnj@usal.es

Resumen En este trabajo se presenta un modelo analógico del terreno para simular presiones de agua distintas en contextos hidrogeológicos diferentes y que ayudan a explicar los conceptos de nivel piezométrico y nivel freático, permitiendo además visualizar algunas de sus implicaciones geomecánicas principales. Este recurso didáctico se emplea en la docencia de las asignaturas Mecánica de Suelos y Cimentaciones, impartida dentro del Grado de Arquitectura Técnica, y Geotecnia I y II, dentro del Grado de Ingeniería Civil. Se ha utilizado una urna de metacrilato y en ella, con la ayuda de arcillas, gravas y arenas, se ha representado un depósito de agua en reposo, un acuífero libre, el efecto de la subpresión que genera un acuífero confinado en su capa suprayacente, y un perfil en el que coexisten niveles con distintas alturas piezométricas. Los modelos son sencillos de construir y demuestran la importancia de valorar adecuadamente los niveles piezométricos en el terreno.

Palabras clave: Modelo, nivel freático, nivel piezométrico, acuífero libre, acuífero confinado, hidrogeología.

Abstract *In this paper an analog terrain model is presented to simulate different hydrogeological formations. It is useful in order to explain the concepts of piezometric and phreatic level, and helps to visualise some of its main geomechanical implications. We used a methacrylate urn and with the aid of clays, sand and gravel, we modelize a water tank under hydrostatic condition, an unconfined aquifer, the effect of the pore water pressure generated by a confined aquifer in the overlying layer, and a profile in which levels with different piezometric heights coexist. The models are simple to construct, and illustrate the importance of the piezometric levels in the terrain.*

Keywords: Model, phreatic level, piezometric level, confined aquifer, hidrogeology.

INTRODUCCIÓN

A partir de nuestra experiencia docente en el campo de la geología aplicada podemos afirmar que entre los conceptos que más cuesta comprender a los alumnos están los de nivel freático -NF- y nivel piezométrico -NP-. Ambos se confunden habitualmente, algo ya advertido en González de Vallejo *et al.* (2002), y cuando esto se traslada a documentos técnicos -estudios e informes geotécnicos- pueden surgir errores que deslegitimarán cualquier hipótesis o cálculo en la que el agua subterránea esté involucrada.

Acompañando a esta temática, es importante también introducir el término de presión intersticial - o presión del agua -, clave en cualquier cálculo de estabilidad en el que esté involucrado el terreno (taludes, cimentaciones, pantallas,...).

Generalmente, los textos en los que se explican estos conceptos parten de la presentación del teorema de Bernoulli, que va siendo desarrollado matemáticamente para adaptarlo al caso del movimiento de un fluido en el terreno. Sin embargo, este enfoque no corrige una de las principales dificultades que se presentan al tratar muchos aspectos relacionados con las aguas subterráneas: la imposibilidad de visualizarlas (Bach, 2007).

En el campo de la hidrogeología, varios autores han creado modelos analógicos que sirven de apoyo a la hora de explicar qué es un acuífero (Calvo et al., 2007; Huerta et al., 2012). Igualmente, en geotecnia estas herramientas ayudan a comprender y estudiar conceptos muy variados, que van desde los empujes del terreno (Shiau y Hobson, 2011; Monterrubio et al., 2015) hasta los efectos de las excavaciones subterráneas (Mair, 1979; Vardoulakis et al., 2009). Este trabajo pretende aunar ambos campos en modelos que simulen no sólo un terreno con agua, sino también los efectos que la presión de ésta puede tener en la construcción. De este modo se palía la “invisibilidad” de la explicación tradicional del teorema de Bernoulli, y se realzan ante los ojos del alumno las importantes implicaciones técnicas del NP y del NF.

El modelo analógico que a continuación se presenta se ha utilizado fundamentalmente con alumnos de los Grados de Ingeniería Civil y Arquitectura Técnica, aunque también han trabajado con él alumnos del Bachillerato de Excelencia. Los fines que persigue son: (1) demostrar la validez del teorema de Bernoulli en un sistema ideal sin pérdida de carga ni gradiente hidráulico; (2) comprobar el valor de la altura piezométrica en un terreno granular; y (3) simular un perfil del terreno con un acuífero libre en superficie, un acuífero debajo, y un acuífero confinado en la base, coexistiendo de este modo dos niveles piezométricos distintos. Además, para demostrar algunos efectos prácticos de estos conceptos, se simula el levantamiento del terreno por subpresión.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El NP¹ puede definirse como la cota que alcanza el agua respecto a un plano de referencia cuando se deja ésta a la presión atmosférica (González de Vallejo *et al.*, 2002), y representa la capacidad que tiene una gota de agua del subsuelo para hacer un trabajo. No debe confundirse con el NF, que es el lugar geométrico de los puntos en los que la presión de agua es la atmosférica (Jiménez Salas y Justo Alpañés, 1975).

En el terreno, cuando el nivel piezométrico varía entre dos puntos el agua estará en movimiento para tratar de recuperar el equilibrio energético, movimiento que se produce hacia la zona de menor NP. Cuanto mayor sea la diferencia entre los niveles piezométricos, más rápido y con más presión viajará el agua. Por el contrario, cuando el NP entre dos puntos no varía, el agua no se moverá en la dirección que los une.

El movimiento del agua y su aplicación al terreno: nivel piezométrico y nivel freático

El estudio del movimiento del agua subterránea se basa en la aplicación de la ecuación Bernoulli

¹ También se denomina altura piezométrica, carga hidráulica o potencial hidráulico, todos ellos términos sinónimos y denotados habitualmente con la letra “h”.

para fluidos que se mueven con un flujo constante y no viscoso, y considerándose el fluido como incompresible.

Como fluido que es, una gota de agua cuenta con una energía que depende de su posición (energía potencial, E_p), de su velocidad (energía cinética, E_c), y de la presión a la que está sometida (energía de presión, E_{PR}). A partir de ello, y asumiendo el principio de conservación de la energía, ésta no debe variar a lo largo de una línea de corriente, esto es, a lo largo del camino por el que se mueve la gota. Por lo tanto, la suma de E_p , E_c y E_{PR} deberá mantenerse constante mientras no exista fuerza externa al sistema que lo altere. Matemáticamente, puede expresarse así (Ecuación 1):

$$E = E_p + E_c + E_{PR} = mgz + \frac{1}{2}mv^2 + PV = cte. = h$$

-Ecuación I-

siendo (m) la masa de una partícula de agua, (g) la aceleración de la gravedad, (z) la cota o posición de la partícula de agua respecto a un sistema de referencia, (v) la velocidad a la que se mueve el agua, (P) la presión del agua y (V) el volumen de agua.

De manera simplificada, tras expresar el volumen como la relación entre la masa y la densidad, sacar factor común a (m) y (g), y despreciando el sumando en el que se incluye la velocidad del agua², la altura piezométrica (h) se define como la suma de altura de posición (z) y altura de presión (Ecuación II)

$$h = z + \frac{u}{g \cdot \rho_w} = z + \frac{u}{\gamma_w}$$

-Ecuación II-

siendo (u) la presión del agua y (γ_w) el peso específico del agua, esto es, el producto de su densidad por la aceleración de la gravedad.

El nivel freático y el nivel piezométrico en los acuíferos

Un acuífero es un “estrato o formación geológica que permitiendo la circulación de agua por sus poros o grietas, hace que el hombre pueda aprovecharla en cantidades económicamente apreciables para sus necesidades” (Custodio y Llamas, 2001).

Cuando en este tipo de formaciones existe una masa de agua encerrada y que está en contacto directo con el aire, y por lo tanto bajo la acción de la presión atmosférica, se denominan acuíferos libres, y son ejemplos de ellos los depósitos de aluviones formados principalmente por gravas y arenas. En estos acuíferos hay agua que puede moverse con facilidad en su interior y que llena total o parcialmente sus poros. Cuando se perfo-

² Una velocidad elevada de movimiento del agua en el terreno podría ser de 0,6 m/min, que implicaría una altura de velocidad de sólo 5·10⁻⁶ m, valor despreciable en comparación con los otros dos términos, y en todo caso, mucho menor que la precisión con la que se cuenta para poder medir la altura geométrica de un punto cualquiera (Lambe y Whitman, 1979, en González de Vallejo et al., 2002).

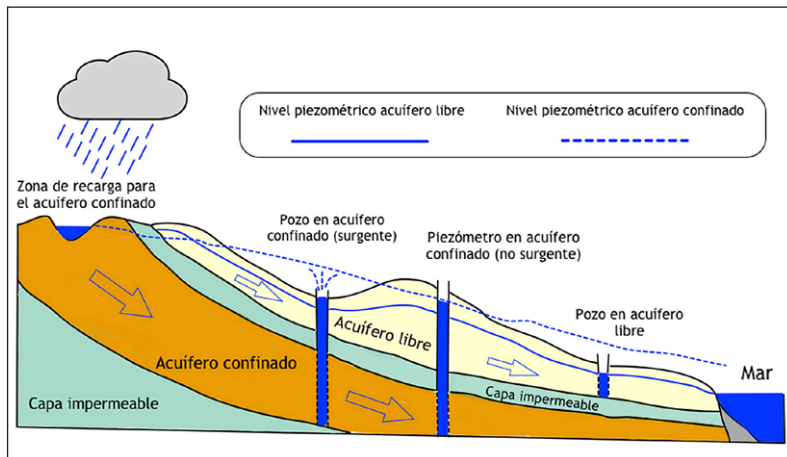


Fig. 1. Esquema general que contempla la presencia de dos acuíferos - libre en superficie, y confinado, cada uno de ellos con su nivel piezométrico (basado en Watson y Burnett, 1993).

ran, el agua inunda la cavidad creada hasta una determinada cota, que va a definir la posición tanto del NF como del NP, ambos coincidentes (Fig. 1). Sobre la superficie de la lámina de agua la presión intersticial tiene un valor igual al de la atmosférica, y desde el punto de vista geotécnico se puede considerar nula; a profundidades mayores, y siempre que el terreno siga siendo permeable, saturado, homogéneo e isótropo, esta presión aumenta linealmente; o al menos teóricamente así debería ser.

Pero también puede darse el caso de que el agua de un acuífero ocupe todos sus huecos y que esté a una presión mayor que la atmosférica: en tal caso los acuíferos pasan a denominarse confinados. Tal es el caso de muchas formaciones de arenas limitadas a techo y muro por capas de terreno impermeables; a estas últimas, cuando aun pudiendo contener apreciables cantidades de agua pero careciendo de la capacidad para poder transmitirla y explotarla, se las denomina acuícludos.

El agua existente en un acuífero confinado en profundidad está aislada de otras aguas que puedan existir por encima de ella. Este aislamiento hace que la presión de poros no crezca linealmente desde la superficie, sino que dependa de la altura piezométrica en la zona de recarga. Esta altura (NP) queda representada por la cota que alcanzaría el agua del acuífero confinado si se hiciese una perforación que lo atravesase (Fig. 1).

NP y NF sólo coinciden en un acuífero libre, mientras que en el resto de situaciones es posible encontrar sobre la misma vertical del terreno distintos niveles piezométricos.

La presión de poros, la posición del nivel piezométrico y sus efectos prácticos

En cualquier actuación sobre el terreno en la que sea necesario conocer la presión de poros se lleva a cabo una campaña de investigación que debe localizar el nivel o niveles piezométricos existentes. Aunque existen distintos sistemas de medida para ello (Custodio y Llamas, 2001), lo más habitual es emplear perforaciones en las que, una vez achicadas y revestidas, se mide la altura que alcanza la lámina de agua. Debe tenerse la precaución de que la tubería de revestimiento que se instala esté ranurada sólo en el tramo en el que se quiera medir el NP, ya

que de no ser así, podrían conectarse acuíferos con distintos NP dando lugar a medidas erróneas.

Si en el planteamiento de la campaña NP y NF se consideran términos sinónimos, problemas como el levantamiento inesperado del fondo de una excavación, o el contar con una resistencia al corte del terreno menor a la prevista pueden llegar a aparecer.

El primero estos escenarios no deseables se produce cuando la presión ejercida por el agua confinada bajo una capa impermeable (de arcillas, por ejemplo) iguala o supera a la presión del terreno existente sobre ella (Fig. 2). Esta presión (u) actúa en contra de la estabilidad, que sólo se ve favorecida por la presión debida al peso de la capa de arcillas. Este equilibrio de fuerzas unitarias se puede plantear matemáticamente del siguiente modo:

$$\left. \begin{aligned} \sigma' &= \sigma - u = 0 \\ \sigma &= d \cdot \gamma_{CL} \\ u &= (h - z_p) \gamma_w \end{aligned} \right\} \sigma - u = d \cdot \gamma_{CL} - (h - z_p) \gamma_w = 0$$

$$d \cdot \gamma_{CL} = (h - z_p) \gamma_w$$

$$(h - z_p) = \frac{d \cdot \gamma_{CL}}{\gamma_w}$$

h : nivel piezométrico o altura piezométrica.

σ' : tensión efectiva.

σ : tensión total.

u : presión de poros o intersticial.

z_p : altura de posición en el punto P.

γ_{CL} : peso específico de las arcillas, esto es, su densidad por la gravedad.

d : espesor de la capa de arcilla por encima del techo de las arenas.

γ_w : peso específico del agua.

Por lo tanto, para conseguir que se levante el fondo de una excavación, y asumiendo que la relación entre el peso específico de las arcillas y el del agua oscila entre 1,5 y 2 habitualmente, la separación entre h y z_p deberá ser 1,5 a 2 veces el espesor de la capa de arcilla.

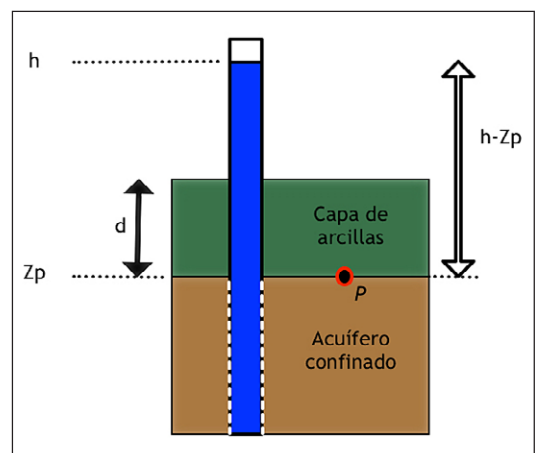


Fig. 2. Esquema para plantear la situación de equilibrio en el caso de existir un acuífero confinado en profundidad con una altura piezométrica elevada, y sobre él una capa de arcillas.

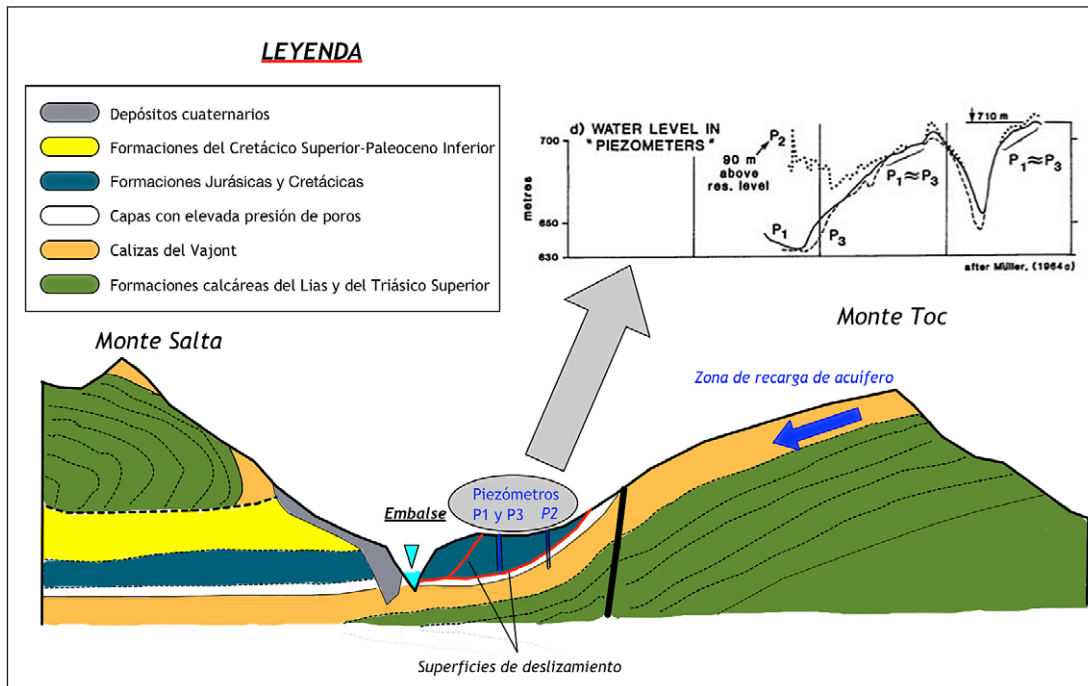


Fig. 3. Corte geológico transversal del valle del río Vajont, con la posición aproximada de los piezómetros instalados para controlar la presión de poros según Selli y Trevisan (1964) en Hendron y Patton (1987). Las medidas en los piezómetros P1 y P3 son similares todo el tiempo y coinciden con la posición de la lámina de agua en el embalse; en el piezómetro P2 las lecturas son mayores hasta mediados del año 1962, momento en el que el movimiento paulatino de la ladera cortó la parte inferior del piezómetro haciendo que éste pasase a registrar datos análogos a los de P1 y P3 (modificada de Semenza y Ghirotti, 2000).

El segundo de los escenarios no deseables al manejar datos de NP y NF queda perfectamente ilustrado con el deslizamiento de una de las laderas de la presa del Vajont, acontecido en el N de Italia en los años sesenta y con consecuencias fatales para cerca de dos mil personas. En este suceso, una gran masa de terreno ocupó bruscamente el vaso del embalse, vaciándolo parcialmente y provocando una ola de más de 200 m que arrasó con todas las poblaciones existentes a su paso. La complejidad de este triste episodio es tal que todavía hoy existen diversas teorías en relación a su génesis (Semenza y Ghirotti, 2000; Pinyol y Alonso, 2010), aunque parece claro que se produjo un error en el diseño de los piezómetros -más cortos de lo necesario- que enmascaró la verdadera posición del NP en las capas próximas a la superficie del deslizamiento y por lo tanto con un papel crítico en su desencadenamiento (Fig. 3). (Belloni y Stefani, 1987; Hendron y Patton, 1987). Bien instalados y adecuadamente emplazados, estos instrumentos habrían permitido estimar la verdadera presión de poros en esas capas críticas -muy elevada y relacionada con la zona de recarga del acuífero montaña arriba-, y no sólo la de las capas suprayacentes, mucho más baja y relacionada con la posición de la lámina de agua en el embalse. Como el desencadenamiento de deslizamientos depende en gran medida de la resistencia al corte del terreno, y ésta a su vez se reduce con presiones de poros elevadas, los cálculos de estabilidad muy probablemente hubiesen previsto el deslizamiento.

CONSTRUCCIÓN DEL MODELO ANALÓGICO

Para la construcción del modelo analógico el requisito impuesto de partida fue la versatilidad, que permitiese emplearlo en otros contextos relacionados con las asignaturas en las que impartimos docencia, además de fácil y rápido de montar.

El material necesario para su construcción puede verse en la Fig. 4, siendo lo principal un recipiente estanco que actúa de continente, donde para que las distintas fases del modelo puedan llevarse a cabo son necesarias una serie de actuaciones, que se pasan a describir.

El continente del modelo y los piezómetros

El modelo se ha construido en el interior de una urna de metacrilato perfectamente estanca, con unas dimensiones en planta de 350 x 120 mm, y una altura de 200 mm, con un espesor de paredes de 8 mm. Para instalar diversos piezómetros a lo largo de la urna se replantearon y perforaron nueve taladros pasantes de 2,5 mm de diámetro, empleando para ello una taladradora de columna modelo IBARMIA SX-32 (Fig. 5). Estas nueve perforaciones se emplazaron a las siguientes alturas, medidas desde el fondo interior de la urna: 13,7 mm (P1 y P2), 31,5 mm (P3, P4 y P5); 74,3 (P6 y P7); y 134,9 mm (P8 y P9). Posteriormente, sobre ellas se perforaron taladros ciegos de 3,5 mm de diámetro y 6,26 mm de profundidad, que se rosaron después con la ayuda de un macho de roscar. Una vez concluidas estas operaciones se instaló en cada perforación un racor de métrica 5 (M5) y diámetro interior de 3,89 mm. Entre el racor y el fondo de cada perforación se colocó un pequeño fragmento de filtro de malla metálica (Fig 6).

Finalmente, a cada racor se le acopló un tubo de goma flexible de 2 mm de diámetro interior y 4 mm de diámetro exterior, para su posterior acople a un panel multimanómetro equipado con diez tubos verticales para tomar lecturas de los niveles piezométricos. La resolución del panel es de 1 mm. Todo el conjunto de perforaciones, racores, tubos flexibles y panel multimanómetro conforma el sistema de piezómetros del modelo (P1 a P9). No obstante, los modelos que en este trabajo se presentan podrían desarrollarse igualmente con únicamente cuatro piezómetros, por ejemplo: P1, P2, P6 y P8).

Fig. 4. Materiales empleados para la construcción del modelo.

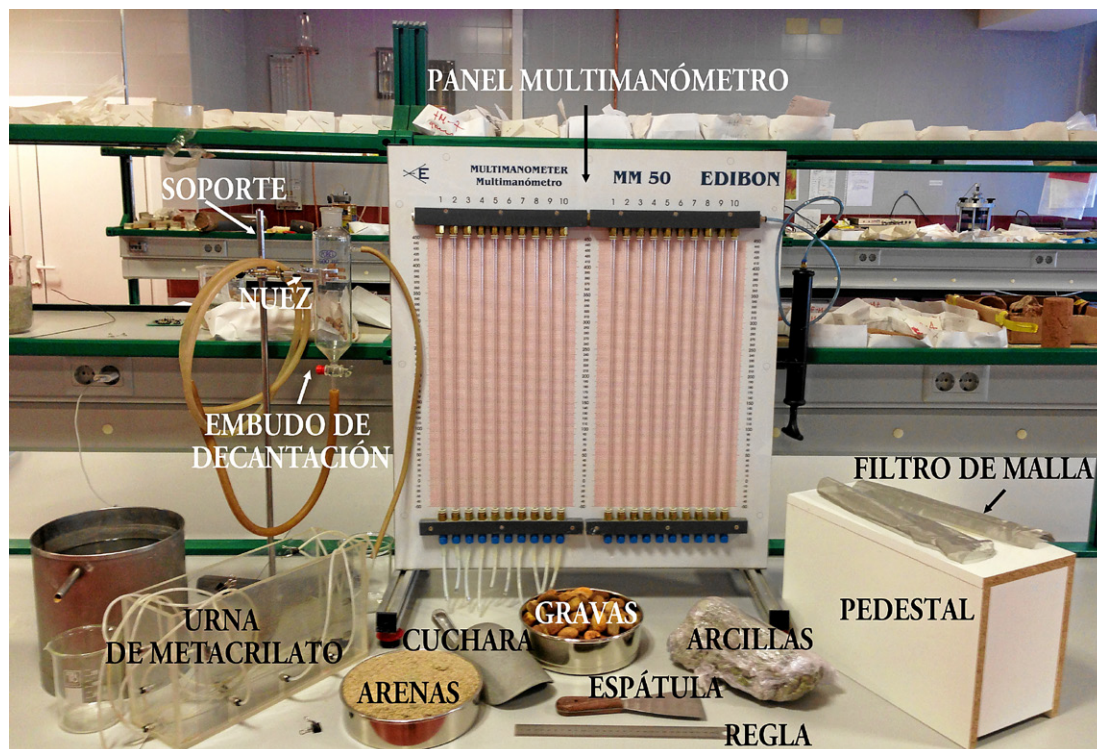


Fig. 5. Proceso de elaboración de la conexión para los piezómetros: taladros.



En la explicación y cálculos de altura piezométrica y presión de poros se ha considerado que la “cota 0” se corresponde con la superficie del mesado en la que se apoya todo el modelo. El valor de las alturas de posición de los piezómetros se puede consultar en la Tabla I, y en la figura 7.

El contenido

Dentro de los contextos hidrogeológicos, se ha optado por analizar el más sencillo formado por un acuífero libre, en donde el NF coincide con el NP; de entre los complejos, se destaca aquí por su interés didáctico el formado por la superposición en la vertical de un acuífero libre en superficie y de otro confinado en profundidad, lo que se traduce en la coexistencia de dos NP en la vertical. Este segundo contexto además sirve para mostrar la desconexión hidráulica existente entre los dos acuíferos, aspecto que por nuestra experiencia es también poco intuitivo para el alumno.

Para modelizar el terreno se han seleccionado tres tipos de materiales, todos ellos naturales. Para



Fig. 6. Detalle de los piezómetros: racores y filtros de malla.

el nivel de acuífero se han utilizado 2,5 kilogramos de una arena gruesa, $0,6 < D^3 < 2$ mm, proveniente del tamizado de un suelo arenoso y algo limoso recogido en las inmediaciones de la localidad de Arroyo de la Encomienda (Valladolid). También del mismo lugar son las arcillas de color verde y alta plasticidad empleadas para simular una capa arcillosa e impermeable; éstas, antes de incorporarse a los modelos, se secan al aire, se machacaron con mazo de goma y se mezclaron con agua en una proporción ligeramente superior a la de su límite líquido. Una vez preparada, la pasta debe pesar en torno a 3,0 kilogramos. El tercer y último material empleado han sido gravas medias ($20 > D > 10$ mm) redondeadas – aproximada-

³ D, diámetro de partículas.

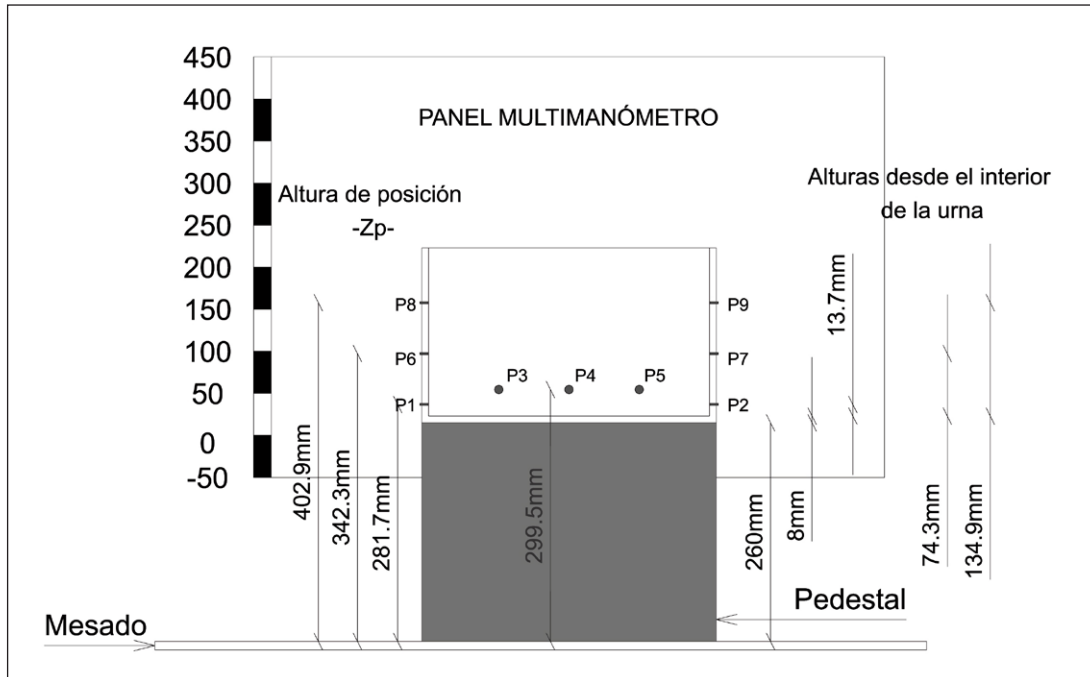


Fig. 7. Esquema para medir la altura de posición calculada en la tabla I.

PIEZÓMETRO	ALTURA DE POSICIÓN				
	DISTANCIA MESADO-BASE DE LA URNA (mm)	GROSOR DE LA BASE DE LA URNA (mm)	DISTANCIA INTERIOR BASE URNA-PIEZÓMETRO (mm)	TOTAL (mm)	
				NOTACIÓN	VALOR (mm)
P1 y P2	260	8	13,7	$Z_{P1}=Z_{P2}$	281,7
P3, P4 y P5	260	8	31,5	$Z_{P3}=...=Z_{P5}$	299,5
P6 y P7	260	8	74,3	$Z_{P6}=Z_{P7}$	342,3
P8 y P9	260	8	134,9	$Z_{P8}=Z_{P9}$	402,9

Tabla I. Altura de posición para cada uno de los puntos en los que están instalados los piezómetros.

mente 3,0 kilogramos - procedentes del tamizado de una muestra recogida en un nivel de terraza del río Duero en el término municipal de Boecillo (Valladolid), y con ellas se ha simulado otro nivel acuífero.

Como material auxiliar se ha empleado un filtro de malla metálica muy tupida que, colocado entre las superficies de contacto de las distintas capas, evita la mezcla de materiales. Asimismo, la urna se ha emplazado sobre un pedestal de madera contrachapada que, al elevar el nivel de base de la urna, permite que todas las lecturas de alturas piezométricas se registren en el panel multimanómetro (Fig. 4).

Simulación de la carga hidráulica

Con la excepción de las dos primeras fases que se describen en los apartados siguientes, este modelo precisa de un depósito de agua en altura con el que controlar la carga hidráulica en el nivel del acuífero confinado. Para ello se ha empleado un embudo de decantación de 500 ml, acoplado a un soporte de laboratorio con una doble nuez (Fig. 4). Este depósito se puede alimentar manualmente, o en el caso de que se requiera una carga hidráulica constante, a través de una toma de agua del laboratorio. Al poder variar la posición del embudo y su altura de lámina de agua, se puede variar la carga hidráulica a transmitir al modelo, y con ello la presión en el agua intersticial del acuífero inferior.

MODELIZACIONES ANALÓGICAS

A partir de las indicaciones recogidas en el apartado anterior es posible llevar a cabo diferentes modelizaciones que, paso a paso, sirven para demostrar los conceptos de NP, NF, acuífero libre, subpresión y acuífero confinado. En este apartado se describen todas ellas, estimándose un tiempo de dos horas para poder completarlas y explicarlas adecuadamente a los alumnos. También en el canal Youtube se han colgado varios videos que permiten reproducir su construcción (Nespereira et al., 2014a; 2014b; 2014c). En la Tabla II se resume el objetivo pretendido por cada una de ellas, los conceptos que se deben manejar, y el tipo de alumnado para el que pueda aplicarse.

La presión de poros y la altura piezométrica en un depósito de agua aislado

Se coloca la urna sobre el pedestal y, con los piezómetros cerrados - para lo que se pueden emplear clips pinzando los tubos de gomas flexibles -, se llena de agua. A continuación se conectan los nueve piezómetros al panel multimanómetro (Fig. 8) y se van abriendo paulatinamente, de abajo hacia arriba, para que se vaya viendo hasta donde asciende realmente el agua. La cota del nivel del agua en

Tabla II. Resumen de los modelos analógicos creados y los fines que persigue cada uno. Se señala también el tipo de alumno más adecuado para aprovechar cada uno de ellos: S, secundaria; U, universitario. Entre paréntesis cuando se considera el modelo como opcional para un determinado nivel.

MODELO ANALÓGICO	CONCEPTOS FUNDAMENTALES	ALUMNOS
Presión de poros y altura piezométrica en un depósito de agua aislado	Teorema de Bernoulli Presión de poros Altura piezométrica	S (U)
Presión de poros y altura piezométrica en acuífero libre	Acuífero libre Presión de poros Altura piezométrica Nivel freático	S - U
Presión de poros con dos alturas piezométricas distintas	Acuífero libre Acuífero confinados Altura piezométrica Nivel freático	U - S
Levantamiento del fondo del fondo de una excavación por subpresión	Subpresión Adherencia	U (S)

el panel multimanómetro marca el NP (h) de cualquier gota de agua del interior de la urna (Fig. 9); sin embargo, la altura de posición (z) y la altura de presión (u/γ_w , siendo γ_w el producto de la gravedad por la densidad del agua o peso específico del agua, 10 kN/m^3) sí que difieren. Resulta evidente que una gota de agua sobre la misma lámina de agua estará a la presión atmosférica, y por lo tanto, su altura de presión será nula; por el contrario, una gota situada en el fondo de la urna estará sometida a una presión equivalente al peso del agua que está por encima de ella dividida entre la superficie. Matemáticamente, todo ello se puede expresar a partir de la aplicación del teorema de Bernoulli, tal y como se muestra a continuación:

Determinación de la altura piezométrica respecto a la base del mesado (datos que se observan al realizar el modelo):

$$h_{P1} = h_{P2} = (\dots) = h_{P9} = L_{panel} + 50 + 195 = 176 + 50 + 195 = 421 \text{ mm}^4$$

• Cálculo de la presión de poros para una gota de agua ubicada a la altura del piezómetro P1, teniendo en cuenta las alturas de posición incluidas en la Tabla III:

PIEZÓMETRO	H (mm)	Z_{P_i} (mm)	U_i	ALTURA LÁMINA DE AGUA POR ENCIMA DE PIEZÓMETRO (mm)
P1 y P2	421	281,7	$u_1 = u_2 = 1,39 \text{ kPa}$	139,3
P3, P4 y P5	421	299,5	$u_3 = \dots = u_5 = 1,2 \text{ kPa}$	121,5
P6 y P7	421	342,3	$u_6 = u_7 = 0,79 \text{ kPa}$	78,7
P8 y P9	421	402,9	$u_8 = u_9 = 0,18 \text{ kPa}$	18,1
Lámina de agua	421	421	0 kPa	0

Tabla III. Comparativa entre la altura piezométrica (h), la altura de posición (z_{P_i}), la presión de poros (u_i) y la altura de la lámina de agua para cada nivel de piezómetros.

$$h_{P1} = h_{P2}$$

$$z_{P1} = z_{P2}$$

$$h_{P1} = 421 \text{ mm} = z_{P1} + \frac{u_{P1}}{\gamma_w} \Rightarrow u_{P1} = (h_{P1} - z_{P1}) \cdot \gamma_w = u_{P2}$$

$$u_{P1} = \left[(421 - 281,7) \text{ mm} \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{mm}} \right] \cdot 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 1,39 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 1,39 \text{ kPa}$$

Es decir, que se comprueba que la presión de poros (u_{P1}) es el producto de la altura de lámina de agua existente sobre el punto P1 expresada en metros -0,139 m- por el peso específico del agua (unos 10 kN/m^3).

De manera análoga se procede para el segundo (P3, P4 y P5), tercero (P6 y P7) y cuarto nivel de piezómetros (P8 y P9).

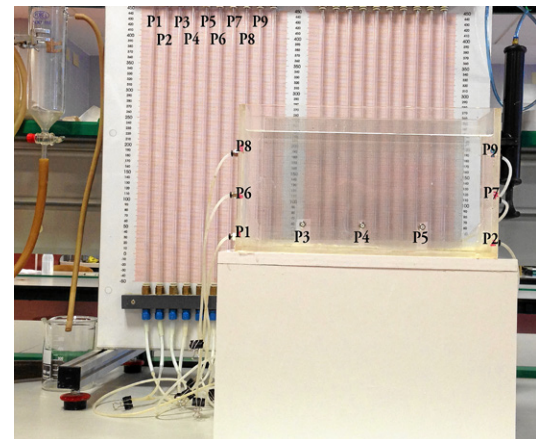


Fig. 8. Urna sobre pedestal de madera, llena de agua y con los nueve piezómetros cerrados y conectados al multimanómetro.

Para la superficie de la lámina de agua, que se proyecta sobre el panel multimanómetro en la misma posición que a la que asciende el agua por los piezómetros, la presión de poros debe ser nula, tal y como se demuestra a continuación:

$$h_{sup} = 421 \text{ mm} = z_{sup} + \frac{u_{sup}}{\gamma_w} \Rightarrow u_{sup} = (h_{sup} - z_{sup}) \cdot \gamma_w$$

$$u_{sup} = \left[(421 - 421) \text{ mm} \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{mm}} \right] \cdot 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 0 \text{ kPa}$$

Por lo tanto, aunque la altura de posición $-z_{P_i}$ - y de presión varíen entre unos piezómetros y otros, la altura piezométrica - h - es la misma (Tabla III) (Fig. 9).

La presión de poros y la altura piezométrica en un terreno granular

Tras llevar a cabo la fase anterior, con la ayuda de una cuchara de laboratorio se introducen en la

⁴ El papel aparece graduado desde -50 hasta 450 mm. La h se calcula respecto a la superficie del mesado en el que se apoya el panel y el pedestal de madera del modelo. La marca que se corresponde con una lectura de panel de -50 mm está a 195 mm de la superficie del mesado.

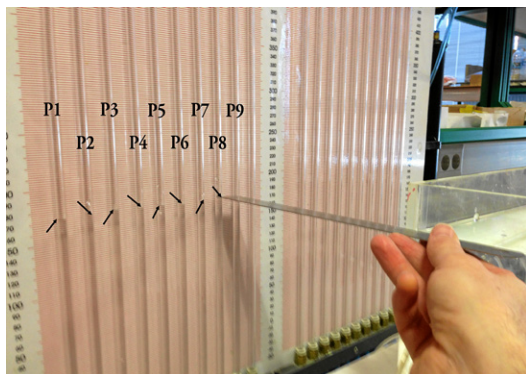


Fig. 9. Las lecturas en el panel multimanómetro son iguales para todos los piezómetros, y para el nivel de la lámina de agua en la urna. NP y NF coinciden.

urna unos 6 cm de arena gruesa, de modo que el techo de esta capa quede subhorizontal y por encima de la cota en la que se emplazan los piezómetros inferiores P1, ..., P5 (Fig. 10).

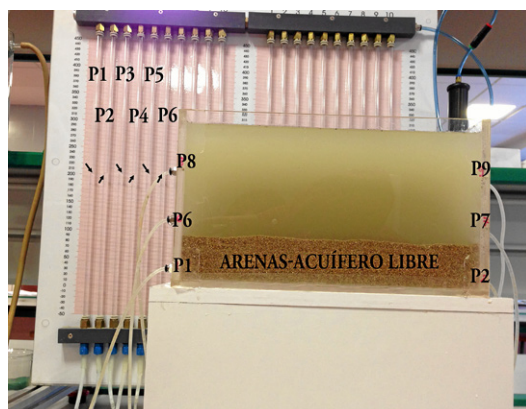


Fig. 10. Urna con un nivel de arenas en la base, sumergido en agua. El panel de control está aislado de los piezómetros y no se registran las alturas hidráulicas.

A continuación se anota la lectura de panel en los piezómetros, comprobándose que en todos ellos se alcanza el mismo nivel (Fig. 11).

Es posible en este momento evacuar algo de agua de la urna para comprobar como todos los pie-

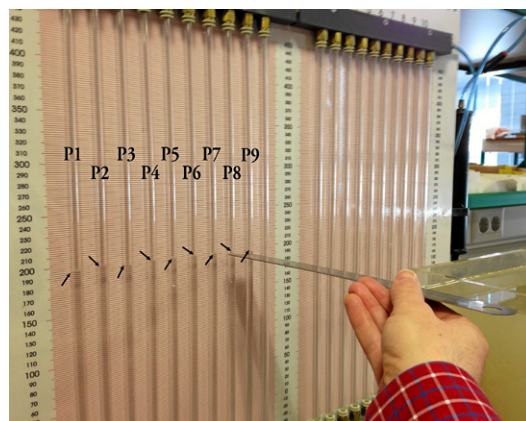


Fig. 11. El agua ha ascendido lo mismo en todos los piezómetros, hasta una cota que coincide con el nivel de la lámina de agua en la urna. NP y NF coinciden.

zómetros responden de la misma manera, disminuyendo sus lecturas en el panel. Así se demuestra el comportamiento hidráulico de un acuífero libre en el que no existe gradiente hidráulico.

Los cálculos que se pueden hacer para determinar la presión de poros son análogos a los empleados en el apartado anterior, pero teniendo en cuenta la variación de las lecturas de panel (es decir, del cambio en el NP-h). Las presiones de poros en este caso, calculadas a partir de los datos del modelo que se representa en la Fig. 11 y que esquemáticamente se explica en la Fig. 1, y para gotas de agua ubicadas a la altura del piezómetro 1 y 7 respectivamente, son las siguientes⁵:

$$h_{p1} = h_{p2} = (\dots) = h_{p9} = L_{panel} + 50 + 195 = 196 + 50 + 195 = 441 \text{ mm}$$

$$h_{p1} = 441 \text{ mm} = z_{p1} + \frac{u_{p1}}{\gamma_w} \Rightarrow u_{p1} = (h_{p1} - z_{p1}) \cdot \gamma_w$$

$$u_{p1} = \left[(441 - 281,7) \text{ mm} \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{mm}} \right] \cdot 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 1,59 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 1,59 \text{ kPa}$$

$$h_{p7} = 441 \text{ mm} = z_{p7} + \frac{u_{p7}}{\gamma_w} \Rightarrow u_{p7} = (h_{p7} - z_{p7}) \cdot \gamma_w$$

$$u_{p7} = \left[(441 - 342,3) \text{ mm} \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{mm}} \right] \cdot 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 0,99 \text{ kPa}$$

Se llega por tanto a la misma conclusión que en el caso anterior: aunque cada piezómetro tiene su propia altura de posición y de presión, su altura piezométrica coincide con la de los demás.

A continuación, y para poder presentar la siguiente fase del modelo, se retira agua de la urna⁶ hasta que ésta quede por debajo del techo de la capa de arenas.

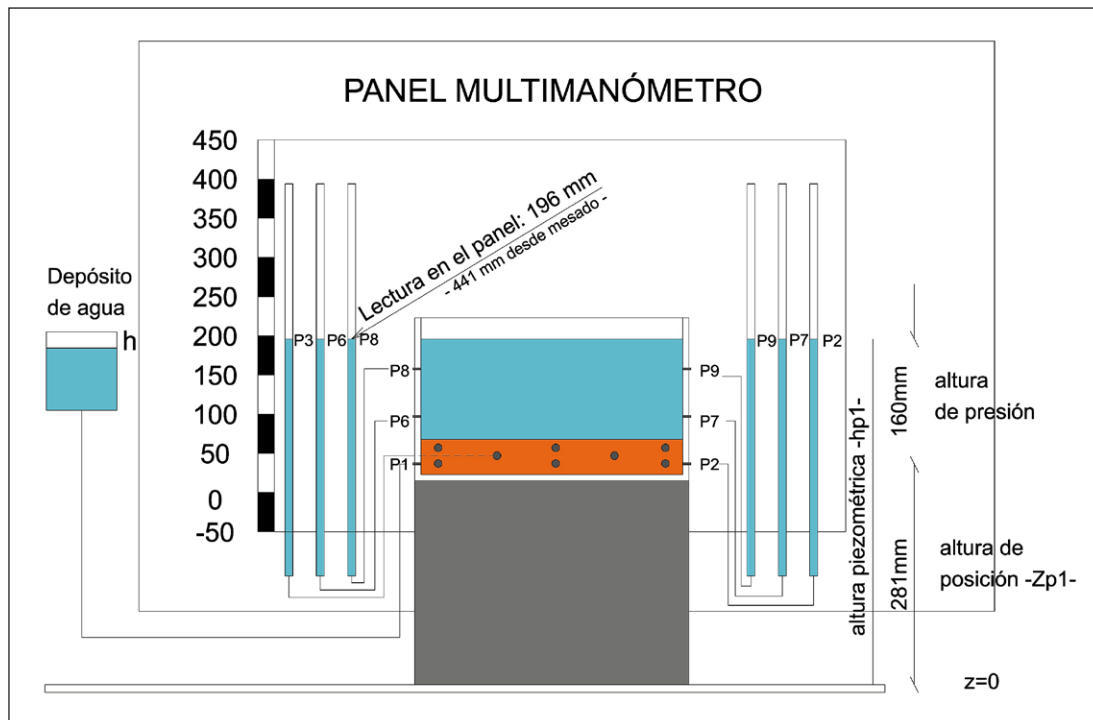
La presión de poros con dos alturas piezométricas

Con todos los piezómetros desconectados y con el nivel del agua en las arenas por debajo de la salidas de las perforaciones inferiores, se pesa la urna. A continuación se extiende por encima de ésta una capa de filtro de malla metálica, previamente tarada, y sobre ésta se coloca cuidadosamente una capa de arcilla previamente amasada de acuerdo a lo indicado en apartados previos. Es muy importante que se preste especial atención a las zonas de contacto entre las paredes de la urna y la arcilla, ya que son puntos por los que pueden producirse filtraciones en el momento de crear un gradiente hidráulico. El espesor de esta capa, que debe ser aproximadamente constante - 2,5 cm en el modelo empleado como ejemplo - permitirá que su punto medio quede a la altura de los piezómetros P6 y P7. Pesando de nuevo la urna, y por diferencia entre las pesadas anteriores, se puede determinar

⁵ El valor de 195 se corresponde con la distancia existente entre el mesado y la base del panel de lectura, y expresada en mm. El valor de 50 es la diferencia entre -50 y 0, medida en el panel.

⁶ Puede hacerse con la ayuda de un vaso, o bien desconectando los piezómetros de los dos niveles superiores de la urna del panel multimanómetro y dejándolos libres dentro de un recipiente contenedor. Este último procedimiento es mucho más lento que el primero.

Fig. 12. Esquema del modelo para el caso de un acuífero libre.



la masa total de la capa arcillosa y por lo tanto también su densidad.

Al concluir este paso el modelo consta de una capa superior arcillosa, impermeable, bajo la que existe un nivel con agua que en este momento está a presión atmosférica. No hay gradiente hidráulico, y si se abren los piezómetros inferiores (P1, ..., P5), en el panel de control el agua alcanzará la misma cota que la que tiene el embudo que actúa de recarga de este acuífero.

A continuación se coloca una nueva malla de filtro sobre el techo de las arcillas, y por encima de la misma, una capa de gravas gruesas cuyo espesor sea tal que su techo no llegue a la cota del nivel de piezómetros superiores. Con las tres capas de material colocadas, se conectan todos los piezómetros al panel y, con la ayuda de un recipiente, se vierte agua sobre la capa de gravas hasta que su nivel supere al menos en un centímetro el de los piezómetros superiores (Fig. 13).

Este nivel, tal y como lo corrobora el panel multi-manómetro, coincide con el de la lámina de agua en la urna, pero por el contrario, los piezómetros P3, P4 y P5, emplazados en el nivel de arenas, van a marcar una altura piezométrica inferior y coincidente con la de la lámina de agua en el embudo de recarga. En este momento, en el perfil del terreno el nivel freático coincide con el nivel piezométrico de la capa de gravas (Fig. 14) y se emplaza por encima del nivel piezométrico de las arenas.

Para completar este modelo, el embudo de agua se eleva por encima de la cota de la lámina de agua en la urna, de modo que en el panel poco a poco se va observando como el nivel piezométrico de la capa de arena aumenta, llegando a superar el nivel freático o piezométrico de las gravas (Fig. 15). Así se está visualizando la coexistencia en un mismo perfil de dos niveles piezométricos distintos, en un contexto en el que existe un acuífero confinado – las arenas

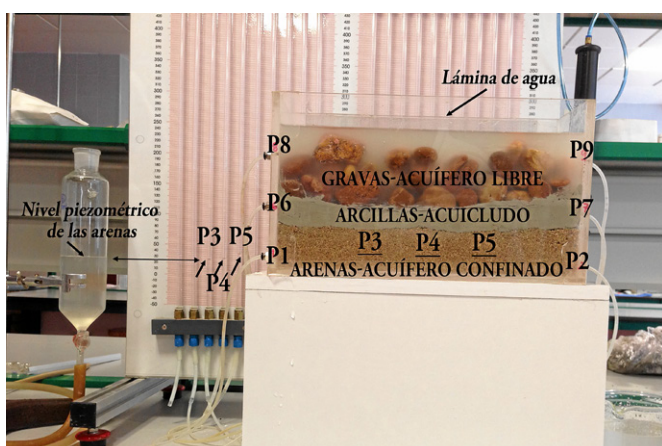


Fig. 13. Urna con una capa inferior de arena gruesa de 6 cm de espesor, intermedia de arcilla de 2,5 cm, y superior de grava gruesa de 6,5 cm. A la izquierda, embudo conectado a la urna a través de P1, y con la lámina de agua marcando la posición del nivel piezométrico en P3, P4 y P5.

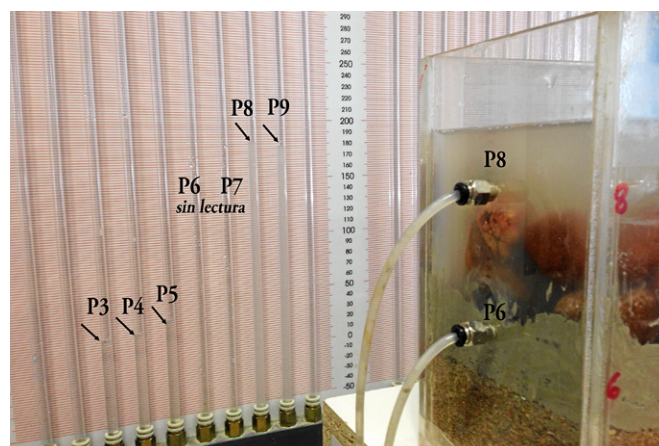


Fig. 14. Altura piezométrica en las gravas -P8 y P9- coincidiendo con el nivel de la lámina de agua en la urna. Altura piezométrica en las arenas confinadas -P3, P4 y P5- por debajo de la de las gravas y coincidente con la cota de la lámina de agua en el embudo.



Fig. 15. Altura piezométrica en las arenas (cota de la lámina de agua en el embudo) por encima de la de las gravas (cota de la lámina de agua en la urna). El peso del agua y las gravas evitan el levantamiento de la capa de arcillas por efecto de la subpresión en las arenas.

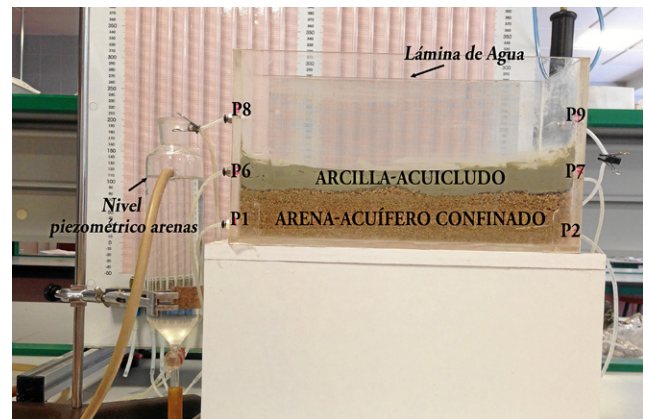


Fig. 17. Urna con una capa inferior de arena gruesa de 6 cm de espesor y otra de arcilla de 2,5 cm. La arena no está saturada en el momento inicial.

gruesas – y un acuífero libre, representado este último por la capa de gravas. Entre ambos, las arcillas muestran su carácter de acuícludo, aislando ambos niveles (Fig. 16).

El levantamiento del fondo de una excavación por efecto de la subpresión

La importancia de controlar las posiciones de las distintas alturas piezométricas se puede demostrar con un modelo que simula el levantamiento del fondo de una excavación debido al efecto de la subpresión, término que se aplica generalmente en contextos en los que existen cimentaciones o presas y que hace referencia a las presiones intersticiales que actúan sobre un plano horizontal produciendo una aparente pérdida de peso del material sobre el que actúan.

Para ello se crea un contexto geológico que incluye un acuífero confinado en profundidad. Si en un

contexto similar al que se va a modelizar, las investigaciones previas no estudian adecuadamente la piezometría de las distintas capas, los efectos podrían ser muy negativos para el desarrollo de la obra.

Para este caso se vierte una capa de arenas en el fondo de la urna, y sobre ésta una capa de arcillas; las arenas van a funcionar como acuífero confinado, y las arcillas como capa impermeable. El piezómetro P1, a la altura de la capa de arenas, se conecta al embudo o zona de recarga del acuífero, que debe estar con su salida cerrada y con su nivel de agua ubicado aproximadamente a la misma cota que la superficie de contacto entre la arena y la arcilla (Fig. 17). Si se abre el embudo, el agua entrará en las arenas a través de P1 haciendo que poco a poco la altura piezométrica en éstas –que se controla a través de los piezómetros P2, P3, P4 y P5– vaya aumentando y llegue a igualarse con el nivel del agua del embudo. Posteriormente, con toda la capa de arenas ya llena de agua, se eleva de manera significativa el embudo respecto a la zona de contacto arena-arcilla, provocando que los niveles piezométricos aumenten en los piezómetros de las arenas. En poco tiempo, con un gradiente hidráulico suficientemente elevado - lo que se consigue o bien aumentando la altura del depósito de agua, o bien disminuyendo el espesor de la capa de arcilla -

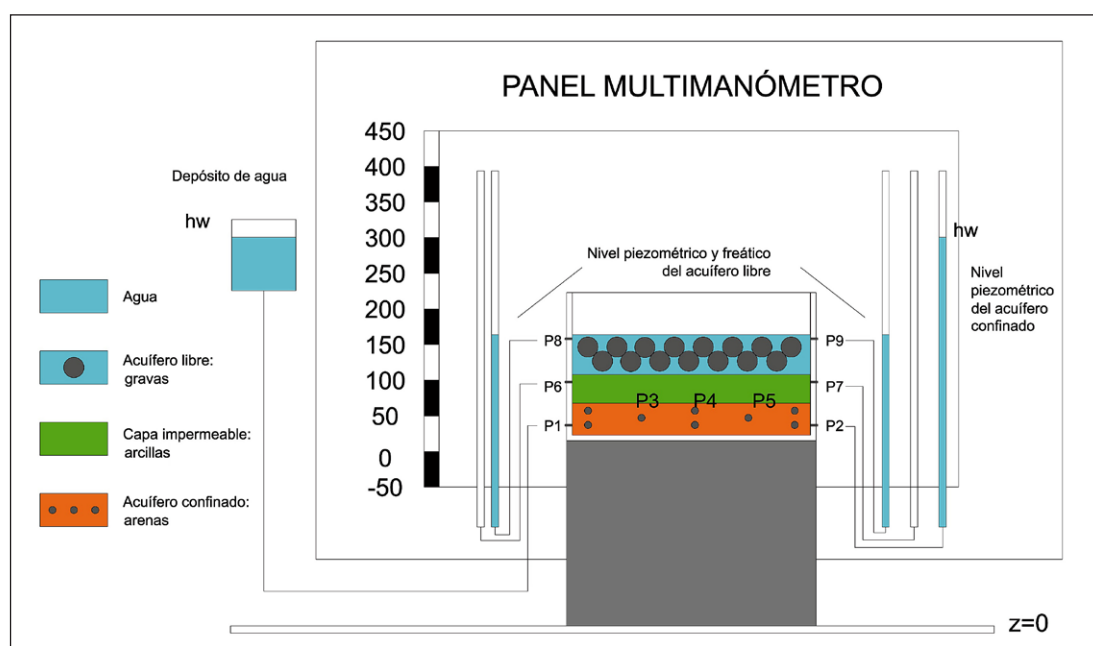


Fig. 16. Esquema del modelo de dos alturas piezométricas y un nivel freático.

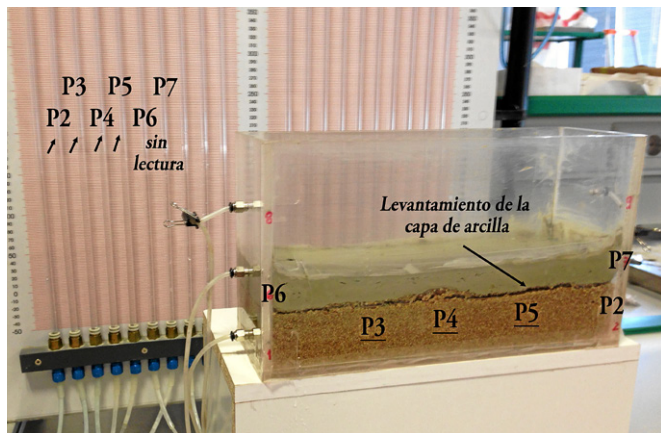


Fig. 18. Inicio del levantamiento de la capa de arcilla debido a la subpresión que ejerce el agua sobre su base.

poco a poco comenzará a verse que la interfase arcilla-arena comienza a separarse, y la superficie de la arcilla se abomba por efecto de la presión del agua existente en los poros del acuífero confinado (Fig. 18). Las grietas que se van formando terminan por atravesar la capa de arcilla, momento en el que los piezómetros disminuyen su altura (Fig. 19).

En todo momento, las lecturas de P6 y P7 sirven para comprobar que en las arcillas la circulación de agua es inapreciable.

Veamos un ejemplo en el que analizamos numéricamente lo que debe ocurrir – y cuando- y lo que realmente ocurre. Para lo primero, el tratamiento numérico se basa de nuevo en la aplicación del teorema de Bernoulli, que teniendo en cuenta los datos observados, queda del siguiente modo:

$$h_{p3} = h_{p4} = h_{p5} = L_{panel} + 50 + 195 = 282 + 50 + 195 = 527 \text{ mm}$$

$$z_{p3} = z_{p4} = z_{p5}$$

$$h_{p3} = 527 \text{ mm} = z_{p3} + \frac{u_{p3}}{\gamma_w} \Rightarrow u_{p3} = (h_{p3} - z_{p3}) \cdot \gamma_w = u_{p4} = u_{p5}$$

$$u_{p3} = \left[(527 - 299,5) \text{ mm} \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{mm}} \right] \cdot 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 2,28 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 2,28 \text{ kPa}$$

Así se comprueba que la diferencia de cota entre h_{p3} y z_{p3} es de 227,5 mm; si el espesor de la capa de arcillas es de unos 25 mm, el balance de fuerzas unitarias indicaría que con una diferencia de unos 50 mm debería de ser suficiente para provocar el levantamiento, pero el modelo está multiplicando por cuatro este valor, siendo necesaria una separación mayor. ¿Qué causa podría explicar esta aparente incoherencia? ¿Por qué el levantamiento tiene lugar mayoritariamente en las zonas centrales del modelo? Ambas son preguntas abiertas que obligan al alumno a pensar más allá que en la demostración del fenómeno en sí.

EXPERIENCIA ADQUIRIDA

Este modelo funciona adecuadamente tal y como demuestran las medidas que se toman en los piezómetros y el levantamiento que se observa en las arcillas en la fase de subpresión. No obstante, durante la realización del mismo se pueden producir pequeñas anomalías que, pese a lo que podría pensarse en un primer momento, enriquecen aún más si cabe esta metodología.

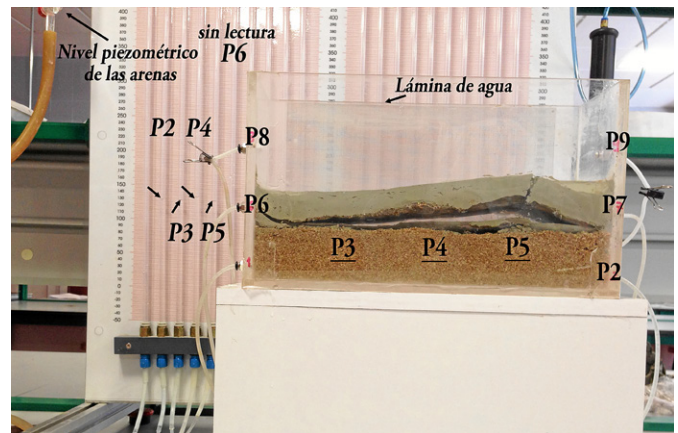


Fig. 19. Rotura de la capa de arcilla.

La primera de ellas suele aparecer en relación con los piezómetros. Cuando éstos se conectan al panel puede quedar aire atrapado en su interior, haciendo que el NP que se visualiza resulte incoherente con el contexto hidráulico. Cuando así ocurre, se debe desconectar el piezómetro del panel, dejar que circule agua –lo que expulsa el aire causante del fallo– y volverlo a conectar. Como hemos dicho, esta circunstancia es más una bondad del modelo que un defecto, ya que sirve para hacer hincapié en la importancia de la correcta ejecución de los trabajos de instalación de las medidas de auscultación o control ya no sólo de piezómetros, como el caso que nos ocupa, sino también de otras medidas que puede ser necesario controlar durante una obra o ensayo de campo. La idea a transmitir es que no basta con tener instrumentos que midan, es necesario asegurarse de que además midan bien y que los datos que reporten sean coherentes con las circunstancias dadas.

La segunda anomalía se observa al final del modelo del levantamiento del fondo de una excavación, y siempre que se analice numéricamente el problema planteado. En este caso, los cálculos indican que para que se levante la arcilla se necesita un NP en las arenas confinadas que sea unas dos veces superior al espesor de aquellas. Sin embargo, experimentalmente los alumnos pueden comprobar que se necesita una altura mayor. Esto es debido a la adherencia entre la pared de la urna y la arcilla, es decir, a la presencia de una presión extra no incluida en el planteamiento del equilibrio vertical y que juega a favor de la estabilidad del fondo (Fig. 20). Cuantitativamente, esta fuerza puede estimarse si se compara la altura del depósito que recarga el acuífero confinado cuando se levantan las arcillas tal y cómo se ha descrito en este trabajo, y la misma altura pero medida tras haber añadido un desencofrente a las paredes interiores de la urna que anule la mencionada adherencia.

La acción de la adherencia explica también el levantamiento del fondo preferentemente en las zonas centrales de la urna. Esto es así porque para una misma superficie de “x” cm², cuando se considera ubicada en los extremos del modelo existe una fuerza por adherencia mayor que cuando se ubica en la zona central: mientras que en el primer caso la

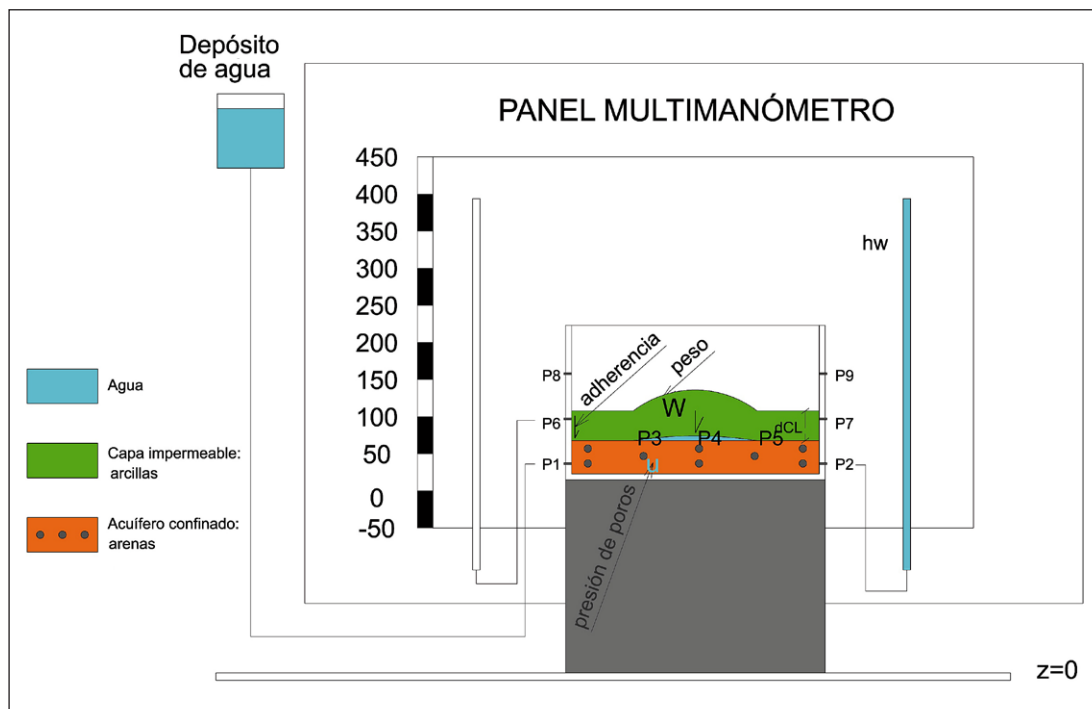


Fig. 20. Esquema de las tensiones que actúan sobre la interfase acuífero-zona impermeable en los extremos de la urna.

adherencia actúa en tres de los cuatro lados que definen el perímetro de la superficie, en la zona central sólo lo hace en dos.

De acuerdo con nuestra experiencia, aunque la primera fase del modelo resulte la más alejada del modelo real, es crucial a la hora de conseguir un completo entendimiento de los conceptos manejados. Antes de llevarla a cabo, el alumno mayoritariamente se inclina a pensar que el agua va a ascender por los piezómetros a alturas distintas según la posición del piezómetro en cuestión. Sin embargo, cuando comprueba lo que ocurre, y realiza los cálculos de altura de posición y de presión de agua, pasa a asumir el significado de ambos, siendo ya mucho más sencillo dar paso a situaciones cada vez más complejas (acuífero libre primero, y acuífero confinado después).

Desde el punto de vista didáctico, es recomendable que a la vez que se va explicando sobre el modelo los conceptos que se manejan, al alumno se le planteen varias cuestiones: hasta dónde ascenderá el agua en cada uno de los piezómetros, cuál es el valor de la presión de poros en diversos puntos según los datos de las medidas del NP, diferenciar la posición o posiciones del NP y del NF...

Las cuestiones relacionadas con el modelo del levantamiento quizás sean más adecuadas para alumnos de titulaciones universitarias, sobre todo en lo relativo a su enfoque analítico, pero tienen también interés para alumnos de secundaria. En estos casos, se puede involucrar a los alumnos haciéndoles proponer la posición a la que se coloque el embudo de recarga del acuífero confinado.

Estos modelos se introdujeron hace dos cursos en la docencia, aunque sólo este último año se han abordado en su totalidad dentro de clases impartidas en los Grados de Ingeniería Civil y Arquitectura Técnica. Desde entonces, dentro de las preguntas de examen se ha incluido una en relación a los conceptos de NP y NF. En ambos cursos el número

de alumnos fue muy similar, 97 y 100 en los cursos 2013/14 y 2014/15 respectivamente; pero si en el primero las respuestas puntuadas fueron tan sólo del 12 %, en el segundo ya ascendieron a un 26 %. No escapa que pueden existir otros factores que condicionen esta mejoría, pero a falta de acumular una mayor experiencia con esta metodología, la tendencia apunta hacia una incidencia positiva en la formación adquirida.

CONCLUSIONES

El modelo analógico creado sirve para explicar la diferencia entre el nivel freático y el nivel piezométrico, y se complementa muy bien con las explicaciones teóricas. Su efectividad de cara a mejorar o favorecer la adquisición de los conceptos tratados es clara, habiendo mejorado ostensiblemente el número de alumnos que reciben una evaluación positiva ante preguntas relacionadas con ellos.

La modelización de los efectos de la subpresión es muy interesante para enlazar conceptos aparentemente teóricos con contextos cotidianos como pueden ser las excavaciones con sótanos, y refuerza a ojos de los alumnos la importancia de este tipo de contextos.

Los problemas que se producen en el modelo –piezómetros que inicialmente no marcan, desfase entre los cálculos numéricos y el modelo– son también muy instructivos, ya que ponen de manifiesto el valor de una buena ejecución de todas las tareas del modelo (no basta con conectar los piezómetros, hay que asegurarse de que funcionen bien, lo cual es extrapolable a la instalación real de métodos de control de niveles piezométricos) y explican de manera práctica que las simplificaciones que se hacen en los cálculos quedan del lado de la seguridad.

Los modelos analógicos presentados son adecuados tanto para alumnos de secundaria como de titulaciones universitarias como Arquitectura Téc-

nica o Ingeniería Civil. En el primero de los casos ayudan a adquirir los conceptos de formaciones geológicas desde el punto de vista hidrogeológico, y realzan el importante papel que juegan las propiedades del terreno -en este caso centradas en las presiones intersticiales- cuando sobre él se construye o actúa. Cuando se plantean en el contexto universitario, además de apoyar los conceptos mencionados, permiten que el alumno aborde analíticamente problemas que, en otra escala, podrán estar dentro del desempeño de sus tareas profesionales futuras.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado a través del Proyecto de Innovación Docente de la Universidad de Salamanca ID2012/0264 "Creación de modelos a escala de situaciones reales en distintas obras para estudiar el comportamiento geomecánico de materiales granulares y cohesivos".

BIBLIOGRAFÍA

Bach, J. (2007). Las aguas subterráneas. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 15(3), pp. 226-227.

Belloni, L.G., Stefani, R. (1987). The Vajont slide: Instrumentation—Past experience and the modern approach. *Engineering Geology*, 24. 1, 445-474.

Calvo, M., Reyero, C., Vidal, M^a.P., Morcillo, J.G., García, E. (2007). El trabajo con modelos en aguas subterráneas. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 15. 3, 341-357.

Custodio, E., Llamas, M.R. (2001). *Hidrología Subterránea*. 2^a Edición. Tomo I. Ed. Omega, 1157 p.

Lambe, T.W., Whitman, R.V. (1981). *Mecánica de Suelos*. Ed. Limusa, 582 p.

González de Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Ed. Pearson Educación, 744 p

Hendron, A.J., Jr, Patton, F.D. (1987). The Vaiont slide—a geotechnical analysis based on new geologic observations of the failure surface. *Engineering Geology*, 24(1), 475-491.

Huerta, P., Silva, P., Rodríguez, L., Reguillón, R. (2012). Modelos analógicos de acuíferos para la docencia en hidrogeología. *Geotemas*, 13, 50.

Jiménez-Salas, J.A., de Justo Alpañés, J.L. (1975). *Geotecnia y Cimientos I. Propiedades de los suelos y de las rocas*. 2^a Edición. Ed. Rueda, 466 p.

Mair, R.J. (1979). Centrifugal modelling of tunnel construction in soft clay. *PhD dissertation*. University of Cambridge.

Monterrubio, S., Nespereira, J., Yenes, M., Fernández, B. y Alonso, J.A. (en prensa). *Simulación de empujes de tierras con modelos a escala*. En Innovación Educativa en Enseñanzas Técnicas. Vol. II (Coord.: Mata Montes, M.C.). Ed. de la Universidad de Castilla-La Mancha, 1090 p.

Nespereira, J., Monterrubio, S., Fernández, B., Yenes, M., Alonso, J.A. (2014a.) Modelos geotécnicos (I). Operaciones previas. <https://www.youtube.com/watch?v=YFFeVoqfjA>

Nespereira, J., Monterrubio, S., Fernández, B., Yenes, M., Alonso, J.A. (2014b.) Modelos geotécnicos (II). El nivel piezométrico y sus implicaciones técnicas. <https://www.youtube.com/watch?v=QT8MA4tkhdg>

Nespereira, J., Monterrubio, S., Fernández, B., Yenes, M., Alonso, J.A. (2014c.) Modelos geotécnicos (III). Los efectos de las subpresiones. <https://www.youtube.com/watch?v=HmEmA7tpo94>

Pinyol, N.M., Alonso, E.E. (2010). Criteria for rapid sliding II. Thermo-hydro-mechanical and scale effects in Vaiont case. *Engineering Geology*, 114, 211-227.

Selli, R., Trevisan, L. (1964). Caratteri e interpretazione della Frana del Vaiont. *Annali del Museo Geologico di Bologna*. Ser 2, Vol. 32, Fas. 1., 8-104.

Semenza, E., Ghirotti, M. (2000). History of the 1963 Vaiont slide: the importance of geological factors. *Bulleting of Engineering Geology and the Environmental*, 59, 87-97.

Shiau, J.S., Hobson, M.A. (2011). Teaching earth pressure theory using physical models: an example in civil engineering. *Proceedings of the IETEC'11 Conference, Kuala Lumpur, Malaysia*. Consultado en https://eprints.usq.edu.au/20520/2/Shiau_Hobson_IETEC_2011_PV.pdf

Vardoulakis, P., Stavropoulou, M., Exadaktylos, G. (2009). Sandbox modeling of the shallow tunnel face collapse. *Italian Geotechnical Journal*, 1, 9-22.

Watson, I., Burnett, A.D. (1993). *Hydrology: An Environmental Approach*. Buchanan Books, 702 p. ■

Este artículo fue recibido el día 30 de julio y aceptado definitivamente para su publicación el 16 de noviembre de 2014