

# Relación entre la permeabilidad teórica y experimental en suelos del entorno de Oviedo (Asturias, NW de España)

## *Relationship between theoretical and experimental permeability in soils around Oviedo (Asturias, NW of Spain)*

A. GARCÍA FERNÁNDEZ<sup>1</sup>, V. G. RUIZ DE ARGANDOÑA<sup>1\*</sup>, A. SETIÉN<sup>1</sup>, A. RODRÍGUEZ-REY<sup>1</sup>,  
Y L. CALLEJA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Departamento de Geología. Universidad de Oviedo, C/ Jesús Arias de Velasco s/n, 33005-Oviedo, España*  
*\*(e-mail:vgargand@geol.uniovi.es)*

---

**Resumen:** Se ha estudiado la permeabilidad al agua de tres suelos del entorno de Oviedo (N de España) y su relación con algunas de sus propiedades índice. En campo, se realizó una caracterización y clasificación geotécnica, distinguiéndose un aluvión (Nora), coluvión (Ules) y eluvión (Piedramuelle). En laboratorio, se ha medido varias propiedades índice para clasificar los suelos según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Se han determinado los coeficientes de permeabilidad teóricos y experimental (permeámetro de carga constante), realizándose una comparación entre ellos y su relación con algunas propiedades índice.

**Palabras clave:** Suelos, permeabilidad, SUCS, límites de Atterberg.

**Abstract:** The permeability to water of three soils in the surroundings of Oviedo (N of Spain) and its relationship with some of their index properties has been studied. The characterization and geotechnical classification made in the field allow us to distinguish three soil types: an alluvial soil (Nora), a colluvial soil (Ules) and an eluvial soil (Piedramuelle). The index properties for classifying soils according to the Unified System of Soil Classification (USCS) have been measured in the laboratory. The theoretical and experimental permeability coefficients have been determined, using a steady flow permeameter for the experimental one. The comparison between these coefficients and their relationship with the soil index properties have been studied.

**Keywords:** Soils, permeability, USCS, Atterberg limits.

---

El coeficiente de permeabilidad de los suelos es uno de los parámetros más importantes y es de suma importancia en ingeniería geológica (Das, 2008).

Según Jabro (1992), la permeabilidad es una de las propiedades más variables, ya que sufre cambios en las dos direcciones, horizontal y vertical. Se trata por lo tanto de una propiedad compleja cuya magnitud está controlada por propiedades físicas del suelo tales como: distribución de los tamaños de grano, densidad, textura y estructura, además de las características propias del fluido que circula por él (Alyamani y Sen, 1993; De Groot *et al.*, 2012; Salarashayeri y Siosemarde, 2012).

Barr (2001) determina el coeficiente de permeabilidad y su relación con: densidad y viscosidad del fluido, porosidad, radio de acceso de los poros y la gravedad.

La permeabilidad de un suelo puede determinarse por métodos directos e indirectos, si bien todos tienen sus limitaciones debido a la heterogeneidad propia de los suelos. Entre los métodos directos están los ensayos de campo, como son: bombeo, Lugeon, Lefranc, etc. Estos aportan una mayor resolución en los datos, pero su proceso es lento y costoso (Jabro, *opus cit.*); dentro también de los métodos directos están los ensayos de laboratorio, en los que la bondad de los datos obtenidos estarán sujetos, además de a la representatividad de la muestras y, puesto que se utilizan muestras alteradas, a la reproducción de la textura y densidad que presenta el suelo en condiciones naturales (Holtz *et al.*, 2011). En este sentido, debe tenerse en cuenta que en laboratorio la permeabilidad se determina generalmente con un volumen pequeño de muestra que puede no representar la heterogeneidad del medio.

Como métodos indirectos hay ecuaciones empíricas, por medio de las cuales varios investigadores han propuesto estimar la permeabilidad de un suelo en función de la distribución de los tamaños de grano, porosidad y otras variables asociadas al agua. Un compendio de la relación de la permeabilidad teórica con el tamaño de grano y porosidad mediante distintas fórmulas matemáticas puede verse en Kase-now (2010) y Chapuis (2012).

Conocer la permeabilidad de un material tiene aplicaciones muy extensas en ingeniería geológica,

como determinar la tasa de asentamiento de suelos sometidos a carga, diseño de filtros hechos de suelo, estabilidad de taludes y estructuras de retención y el diseño de presas de tierra entre otras (Das, *opus cit.*).

En este trabajo se han determinado las permeabilidades de tres tipos de suelos del entorno de Oviedo, más concretamente en las zonas de Ules, Nora y Piedramuelle. Mediante estudios de campo, se realizó una clasificación geotécnica de los suelos, así como su caracterización basándose en propiedades físicas determinadas a partir de ensayos “*in situ*”. En laboratorio se determinaron las densidades (seca, húmeda y granos minerales), granulometría y límites de Atterberg. El estudio de la permeabilidad se llevó a cabo por método directo (ensayos de laboratorio con un permeámetro de carga constante) e indirectos, mediante las expresiones matemáticas definidas por varios autores: Hazen, 1892; Kozeny-Carman (en Cabalar y Akbulut, 2016); Terzaghi y Peck, 1964; Slitcher (en Vukovic y Soro, 1992) y Alyamani y Sen, *opus cit.* Con los resultados obtenidos, se clasificaron los suelos según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Casagrande, 1948), en adelante SUCS, se realizó una comparativa entre los coeficientes de permeabilidad (teóricos y experimentales) de cada suelo y su relación con otras propiedades determinadas.

### Marco Geológico

Los suelos estudiados se encuentran próximos a Ules, Nora y Piedramuelle, en el concejo de Oviedo. Nora se encuentra al NW, en las inmediaciones del río del mismo nombre; Ules está al N, situado en la ladera Sur del Monte Naranco y Piedramuelle al SE (Fig. 1).

Las zonas objeto de estudio, se encuadran dentro de la zona más externa de la cordillera orogénica varisca, denominada Zona Cantábrica (Lotze, 1945), más concretamente en su extremo oriental, definido por la unidad conocida como La Sobia-Aramo (Jullivert, 1967).

El horizonte “C” de la zona de Ules es Devónico y pertenece a la Formación Naranco; el de la zona del Nora es Carbonífero y pertenece a la Formación



**Figura 1.** Situación de las zonas estudiadas tomada de Google earth ©.

Valdeteja y, en la zona de Piedramuelle, dicho horizonte es Cretácico que según González Fernández *et al.* (2004), pertenece a la Formación Latores. Una localización precisa de la zona de muestreo puede verse en la figura 2. Las coordenadas UTM son: Nora zona 30T, 269817E, 4810601N; Ules zona 30T, 266614 E, 4807130N y Piedramuelle zona 30T, 266830E, 4803309N.

## Metodología

### *Estudios de campo*

En cada afloramiento, se realizó una descripción de las propiedades físicas del material y una clasificación geotécnica de campo; posteriormente se efectuó la toma de muestras para los ensayos de laboratorio.

*Caracterización preliminar de suelos según sus propiedades físicas:* se llevó a cabo mediante ensayos de campo con los que se han determinado el tamaño de las partículas, compacidad, estructura, consistencia, plasticidad, resistencia en seco, alteración y color.

Para determinar la granulometría en el campo se utilizó una balanza con precisión de 1 g y dos tamices de apertura de malla de 5 mm y 0,08 mm (UNE 7050-3, 1997). A partir de los datos obtenidos y su génesis, situación espacial y mecanismos que han actuado en su transporte, se realizó la clasificación geotécnica de campo (Manual de Tierras, 1980), que utiliza los mismos símbolos de grupo que el sucs.

*Muestreo:* Se realizó en las zonas anteriormente citadas, siguiendo criterios de representatividad dentro de los afloramientos existentes en la zona (Fig. 3). Al tratarse de tres tipos de suelo granulares con propiedades físicas diferentes, el tipo de muestra y el volumen de la misma está condicionado por: los ensayos de laboratorio previstos, el tamaño máximo de la partícula del suelo y la calidad del afloramiento (Tabla I).

### *Estudios de laboratorio*

Esta etapa puede dividirse en dos bloques: el primero es el tratamiento previo de la muestra antes de dar

	TAMAÑO MÁXIMO PARTÍCULA (mm)	CANTIDAD MUESTREADA (KG)	TIPO DE MUESTRA EN FUNCIÓN DEL ENSAYO		DENSIDADES (HÚMEDA, SECA Y GRANOS MINERALES) Y LÍMITES DE ATTERBERG
			GRANULO-METRÍA	Permeabilidad	
NORA	49	6	ALTERADA	REMODELADA	ALTERADA - INALTERADA
ULES	72	10	ALTERADA	REMODELADA	ALTERADA - INALTERADA
PIEDRAMUELLE	43	6	ALTERADA	REMODELADA	ALTERADA - INALTERADA

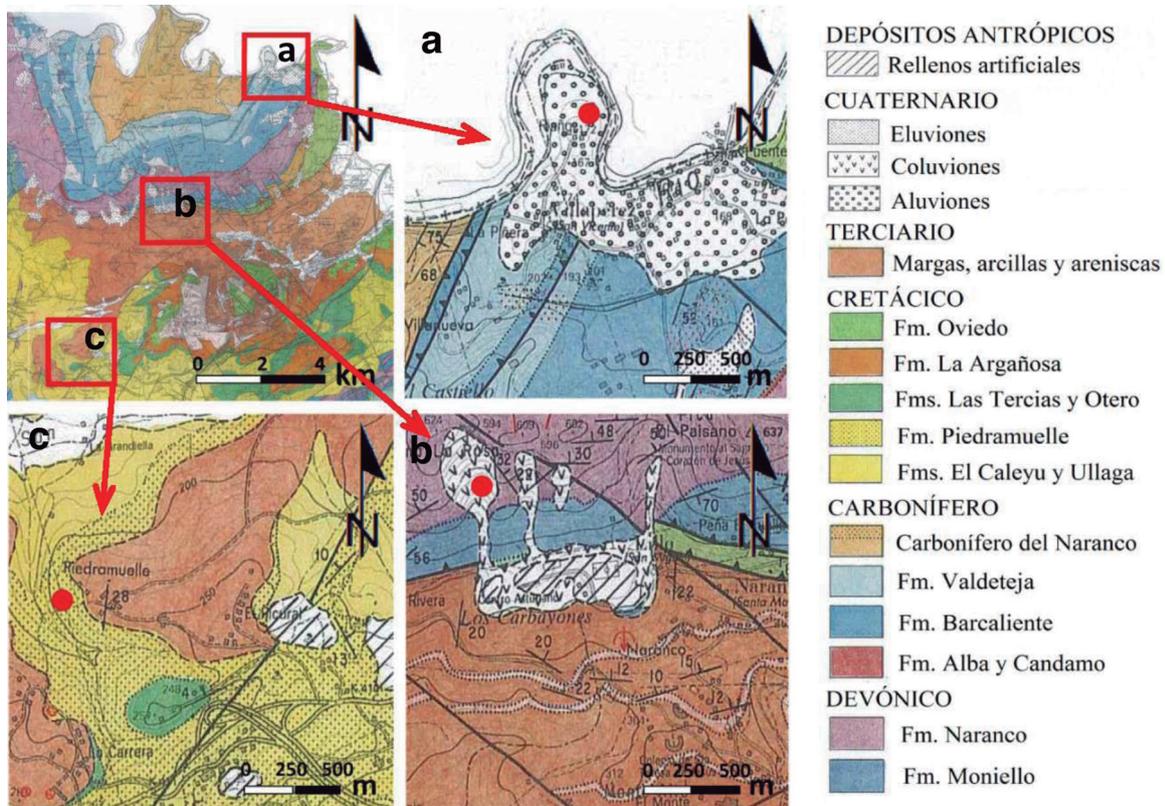
**Tabla I.** Cantidad y tipo de muestra en función de los ensayos realizados.

comienzo a los ensayos de laboratorio; el segundo trata de los ensayos propiamente dichos: densidades (húmeda, seca y granos minerales), granulometría por tamizado seco, límites de Atterberg, y permeabilidad bajo carga constante.

*Preparación de la muestra (UNE 103-100, 1995):* con el fin de facilitar el machaqueo de la muestra previamente al secado se realizó una disgregación manual

consiguiendo el menor tamaño posible de los agregados de partículas y la eliminación de restos vegetales y animales; el resultado es una muestra más fácil de trabajar durante el machacado (Fig. 4). A continuación se siguen los pasos marcados por la norma: secado, machacado, homogeneizado y cuarteo.

*Ensayos de laboratorio:* mediante ensayos de laboratorio se determinaron las densidades (húmeda, seca y



**Figura 2.** Mapa geológico con la situación de los afloramientos: a) Nora, b) Ules y c) Piedramuelle. Extraído de Gutiérrez Claverol y Torres Alonso (1995).



**Figura 3.** Aspecto de los suelos en el afloramiento: a) Nora, b) Ules y c) Piedramuelle.

de los granos minerales, UNE 103-302, 1994), granulometría (UNE 103-101, 1995), límites de Atterberg (UNE 103-104, 1993; UNE 103-103, 1994) y permeabilidad (permeámetro de carga constante) según UNE 103-403 (1999).

A partir de la curva granulométrica y diferentes fórmulas se han determinado: coeficientes de uniformidad ( $C_u$ ) y de curvatura ( $C_c$ ), calibrado ( $C_l$ ) e  $I_0$  (intersección de la línea formada por  $d_{50}$  y  $d_{10}$  con el eje de tamaño de grano). A partir de los valores de densidades del suelo seco y de los granos minerales, se calcularon las porosidades ( $n$ ) correspondientes.

## Resultados

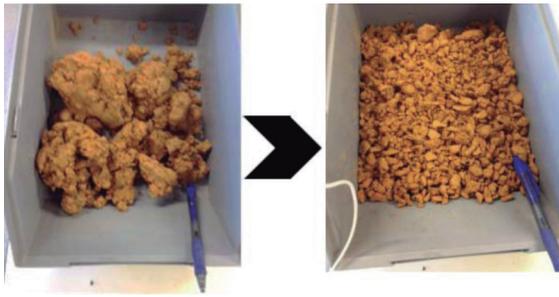
### *Estudios de campo*

*Caracterización del suelo:* a partir de los ensayos de campo descritos en el apartado de metodología, se han determinado varias propiedades físicas que aparecen en la Tabla II; para ello se tuvo en cuenta la climatología, ya que algunas pueden variar en función de la misma.

*Clasificación geotécnica de campo:* para la clasificación geotécnica de los suelos, se tuvieron en cuenta

	Nora	Ules	Piedramuelle
Climatología	Soleado y los 3 días anteriores	Lluvia moderada y los 3 días anteriores.	Nublado. Alternancia nubes y claros los 3 días anteriores
Espesor (m)	Más de 0,70	Más de 2,5	1,3
Tamaño de las partículas	Tacto suave. Presencia notable en matriz de limos y arcillas. Presenta cantos.	Tacto ligeramente áspero. Presencia en matriz de arena fina, limo y arcilla. Presenta cantos	Tacto áspero. Abundancia de arena media-fina en matriz. Presenta cantos
Graduación	Cantos: 10%; Arena fina: 35 % Limo:43% Arcilla: 12%	Cantos: 45% Arena fina: 28% Limo:22% Arcilla: 5%	Cantos: 15% Arena media: 28% Arena fina: 36% Limo:19% Arcilla: 2 %
Compacidad	Ligeramente denso	Muy denso	Suelto
Estructura	Heterogénea, granoselección grosera. Matriz soportada.	Heterogénea. Matriz soportada	Heterogénea. Matriz soportada
Consistencia	Blanda	Firme	Desmenuzable
Plasticidad	Plástico	Moderadamente plástico	Poco a nada plástico
Resistencia en seco	Alta	Alta	Baja
Intemperización	Moderadamente alterado	Ligeramente alterado	Ligeramente alterado
Color (Munsell)	7.5YR 6/6	5YR 5/4	10YR 8/8

**Tabla II.** Características de campo de los materiales estudiados.



**Figura 4.** Muestra del afloramiento Nora: a) previa al desmenuzado y b) después del desmenuzado.

criterios físicos (Tabla II), composicionales y geomorfológicos, además del análisis granulométrico de campo.

*Nora:* el suelo está asociado a zonas de valle, en las inmediaciones del río Nora. Está compuesto por cantos siliciclásticos redondeados de tamaño variable que pueden variar de decimétricos a centimétricos, en una matriz arcilloso-limolítica. La procedencia del material es producto de una terraza fluvial y la morfología de las partículas que componen el suelo indica que ha sufrido transporte fluvial; de acuerdo con todo ello se clasifica como aluvión, (SC): arenas arcillosas, mezclas de arena y arcillas y fracción fina plástica.

*Ules:* el suelo procede de la ladera Sur del Monte Naranco, asociado a zonas de alta pendiente. Está compuesto por cantos angulosos de arenisca ferruginosa de tamaño variable, desde decimétricos a centimétricos, en una matriz limoso-arenosa con algo de arcilla; en base a su situación espacial, composición y morfología de sus partículas este material ha sufrido transporte y es fruto de la alteración del horizonte «C» definido por la Formación Naranco pendiente arriba. La gravedad es el agente principal del transporte, generado por procesos de inestabilidad de laderas, típico de las zonas con pendientes elevadas; por todo ello se ha clasificado como coluvión, (GC): gravas arcillosas, mezcla de gravas, arenas y arcillas, con una fracción fina pástica.

*Piedramuelle:* el suelo está asociado a zonas de baja pendiente. Se compone de cantos siliciclásticos de morfología muy irregular y un amplio rango de tamaños con un máximo de 43 mm, en una matriz predominantemente arenosa con algo de limo y ar-

cilla; sus componentes provienen de la alteración *in situ* del horizonte «C», formado por arenas cretácicas. Debido a esto el suelo es clasificado como eluvión, (SW): arenas bien graduadas, arenas con grava, con pocos finos o ninguno.

#### *Estudios de laboratorio*

En la Tabla III pueden verse los valores de densidades, porosidades, parámetros granulométricos, límites de Atterberg y clasificación geotécnica en laboratorio según el SUCS. Por lo que se refiere a la granulometría, a partir de la relación entre el tamaño de partículas con el porcentaje en peso retenido en cada tamiz, se han construido las curvas granulométricas de cada suelo (Fig. 5), a partir de las cuales se han determinado:  $d_{10}$  (diámetro eficaz),  $d_{25}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{60}$ ,  $d_{75}$ ,  $C_u$ ,  $C_c$ ,  $C_t$  e  $I_0$  (Tabla III); el valor  $d_{10}$  de la curva del Nora, se realizó por extrapolación. Los valores « $d$ » determinados, es el tamaño de grano correspondiente al porcentaje que pasa.

Los porcentajes que pasan en el tamiz n.º 4, han sido los siguientes: Ules, 43%; Nora, 75% y Piedramuelle, 65%.

Se puede decir que los tres suelos presentan una granulometría extendida ( $C_u > 6$ ), siendo  $C_u$ -Ules  $>$   $C_u$ -Piedramuelle  $>$   $C_u$ -Nora. En base a  $C_c$  podemos determinar que tanto el suelo de Nora como el de Ules presentan una mala graduación ( $C_c < 1$ ), mientras que el de Piedramuelle presenta buena graduación, con  $C_c$  entre 1 y 3.

Tomando en consideración los ensayos de laboratorio realizados, puede verse como en el aluvión (Nora) y el eluvión (Piedramuelle) las clasificaciones de campo y laboratorio coinciden, mientras que en el coluvión (Ules) en campo es GC y en laboratorio (más precisa), es GM.

*Permeabilidad teórica:* el cálculo de la permeabilidad teórica, se realiza fundamentalmente en función de la distribución de los tamaños de grano que lo componen mediante diversas expresiones matemáticas. En la Tabla IV pueden verse las formulas usadas en este estudio y los valores obtenidos. Dichos valores están dentro de los intervalos esperados para este tipo de materiales, presentando un intervalo que van

	Nora	Ules	Piedramuelle
Densidad suelo seco (kg/m <sup>3</sup> )	1825	1746	1560
Densidad suelo húmedo (kg/m <sup>3</sup> )	1923	1925	1726
Densidad granos minerales (kg/m <sup>3</sup> )	2652	2706	2693
n (%)	33	36	42
$d_{10}$ (mm)	0,043	0,075	0,113
$d_{25}$ (mm)	0,12	0,15	0,7
$d_{30}$ (mm)	0,13	0,215	0,971
$d_{50}$ (mm)	0,60	17,3	2,85
$d_{60}$ (mm)	1,233	21,4	4,375
$d_{75}$ (mm)	5,5	25	8,5
$C_u$	28,67	285,33	38,72
$C_c$	0,32	0,03	1,91
$C_i$	$2,1 \times 10^{-2}$	$0,6 \times 10^{-2}$	$8,2 \times 10^{-2}$
$I_0$ (mm)	0,025	0,025	0,05
Límite líquido (%)	26,8	20,5	18,3
Límite plástico (%)	18,7	17,74	18,6
<b>Índice de plasticidad</b>	8	3	0
Clasificación SUCS	SC	GM	SW

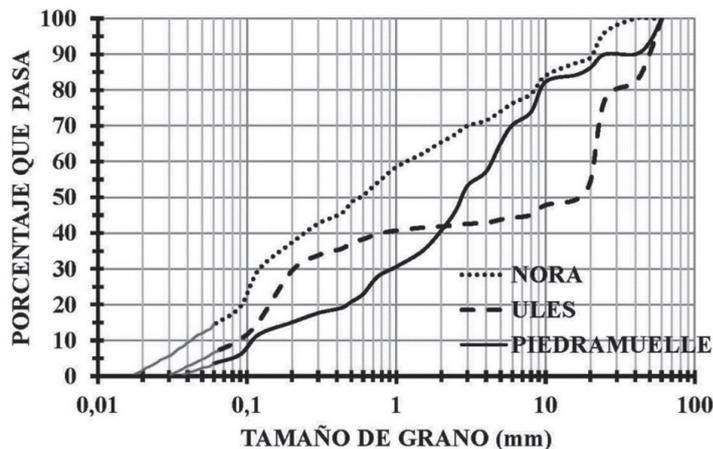
**Tabla III.** Propiedades índice, parámetros granulométricos y clasificación geotécnica.  $n$ : porosidad;  $d_{xx}$ : tamaño de grano correspondiente al porcentaje que pasa;  $C_u$ : coeficiente de uniformidad;  $C_c$ : coeficiente de curvatura;  $C_i$ : calibrado;  $I_0$ : intersección de la línea formada por  $d_{50}$  y  $d_{10}$  con el eje de tamaño de grano.

desde  $0,05 \times 10^{-4}$  a  $30 \times 10^{-4}$  m/s y puede verse como cuanto mayor es el  $d_{10}$ , mayor es la permeabilidad.

En los tres suelos, los valores obtenidos según la fórmula propuesta por Terzaghi y Peck (*opus cit.*) son los mayores, mientras que los determinados según la propuesta de Slitcher (*opus cit.*) son los menores, estando los calculados por Hazen (*opus cit.*), Kozeny-Carman (*opus cit.*) y Alyamani y Sen (*opus*

*cit.*) en valores intermedios. Si comparamos por suelos, los valores de Nora, independientemente de las fórmulas empleadas, son los que presentan los valores menores, seguido del de Ules y por último, siendo el más permeable el de Piedramuelle.

*Permeabilidad bajo carga constante.* Debe tenerse en cuenta que los valores de coeficientes de permeabilidad obtenidos a partir de las muestras ensayadas



**Figura 5.** Curvas granulométricas. En trazo delgado y continuo se muestra la fracción extrapolada.

Autor	Experimental	Permeabilidad ( $k$ ) $\times 10^{-4}$ m/s		
		Nora	Ules	Piedramuelle
		0,15	11,2	30,0
	Fórmula empírica			
Slitchter	$k = (g/v) \times 10^{-2} \times n^{3,287} \times d_{10}^{-2}$	0,05	0,17	0,72
Terzaghi y Peck	$k = (g/v) \times C_t \times ((n-0,13)/(1-n)^{1/3})^2 \times d_{10}^{-2}$	0,16	2,3	12,5
Hazen	$k = (g/v) \times 6 \times 10^{-4} \times (1+10(n-0,26)) \times d_{10}^{-2}$	0,09	0,66	1,95
Kozeny-Carman	$k = (g/v) \times 8,3 \times 10^{-3} \times (n^3 / (1-n)^2) \times d_{10}^{-2}$	0,09	0,05	2,27
Alyamani y Sen	$k = 1300 (I_o + 0,025(d_{50} - d_{10}))^2$	0,2	0,31	2,08

**Tabla IV.** Valores de la permeabilidades teóricas y experimental.  $g$ : gravedad ( $m/s^2$ );  $v$ : viscosidad ( $m^2/s$ );  $n$ : porosidad (%);  $d_{10}$ : diámetro eficaz (mm) y  $C_t$ : calibrado.

en laboratorio no representan de forma exacta la permeabilidad del suelo en condiciones naturales, debido a que se ha determinado en muestras remodeladas. Los resultados obtenidos se expresan en la Tabla IV.

El suelo que presenta una menor permeabilidad se trata del de Nora, con una diferencia de hasta dos órdenes de magnitud con respecto a los otros dos.

Si se comparan los suelos de Piedramuelle y Ules, en este más del 50% de las partículas que componen el suelo pertenecen a la fracción gruesa, mientras que en Piedramuelle esta fracción se encuentra por debajo del 50%; con esta base cabría esperar una mayor porosidad y permeabilidad en Ules, pero no es así debido a la distribución de los tamaños de grano en su curva granulométrica. En la figura 5 puede verse como presenta una granulometría extendida, pero discontinua, con presencia importante de tamaños gruesos ( $\geq 10$  mm) y finos ( $\leq 1$  mm); los finos tienden a depositarse entre los huecos generados por las partículas de mayor tamaño, reduciendo así la permeabilidad del material.

Se puede deducir, de forma cuantitativa, que el suelo que presenta una mayor porosidad (Piedramuelle) es el que presenta una menor oposición a que el agua circule por él (mayor permeabilidad), lo que es además indicativo del contenido en finos del suelo, al ser este inversamente proporcional a la porosidad, por que como ya se comentó anteriormente, las partículas finas tienden a depositarse entre los huecos existentes.

Si se relacionan los datos de permeabilidad determinada experimentalmente con las propiedades índice, porosidad y límites de Atterberg, puede verse como a mayor porosidad, le corresponde una mayor permeabilidad; por otra parte, es el límite líquido y el índice de plasticidad los que mejor correlación inversa presentan. Así, a mayor límite líquido y mayor índice de plasticidad, menor permeabilidad presentan los materiales, lo cual está relacionado con la presencia de finos que tienen los materiales estudiados.

*Correlación entre resultados de la permeabilidad.* En la figura 6 se representan los valores de la permeabilidad teórica calculada según las fórmulas citadas anteriormente y los resultados de la permeabilidad obtenidos en el laboratorio. Puede verse como los determinados mediante el permeámetro de carga constante son, excepto en las muestras de Nora que son más parecidas, significativamente mayores que los calculados teóricamente. En este sentido, Urumovic y Urumovic (2014), relacionaron la permeabilidad determinada mediante fórmulas matemáticas y la obtenida mediante ensayos de campo y determinaron que los valores de campo eran mayores que los obtenidos empíricamente.

Una de las razones por la que se produce esta diferencia entre los resultados, se debe a que las fórmulas no tienen en cuenta la textura y estructura del suelo, mientras que en el ensayo de laboratorio se intentan reproducir. En este sentido, Boadu (2000) dice que la preparación de la muestra para la determinación de la permeabilidad en laboratorio es esencial y en muchos casos puede condicionar sus valores.

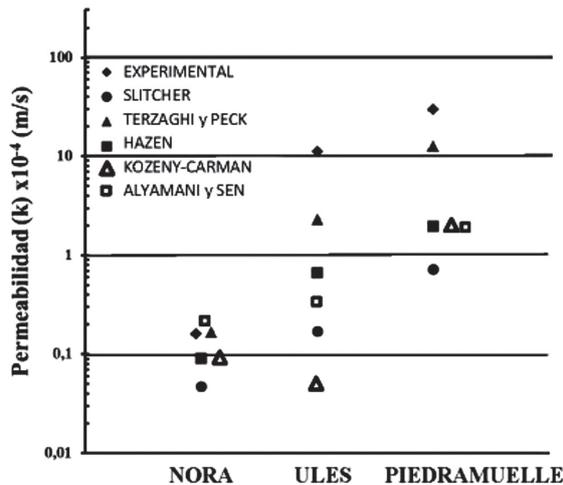


Figura 6. Representación gráfica de los valores de la permeabilidad experimental y teóricas obtenidas.

Por otra parte, los valores calculados mediante la fórmula de Terzaghi y Peck (*opus cit.*), son los más próximos a los determinados experimentalmente (en las muestras del Nora son prácticamente iguales), mientras que los calculados mediante Slitcher (*opus cit.*) son los más diferentes. Los de Hazen (*opus cit.*) y Kozeny-Carman (*opus cit.*) y Alyamani y Sen (*opus cit.*), están en la zona intermedia.

Esto es debido, a que Terzaghi y Peck (*opus cit.*), además de tener en cuenta parámetros comunes con otros autores que influyen en la permeabilidad como son: diámetro eficaz y porosidad, consideran el calibrado.

Slitcher (*opus cit.*), aunque tiene en consideración el diámetro eficaz y la porosidad, según Odong (2007), la citada fórmula es más aplicable a suelos con un tamaño de grano entre 0,01 mm y 5 mm, valores

que no presentan ninguno de nuestros materiales estudiados, por ello son los valores que más se alejan de los determinados experimentalmente.

En la Tabla V, se exponen los porcentajes de variación de los valores teóricos, con respecto a los valores determinados experimentalmente. Mediante un análisis detallado de estas variaciones, se puede decir que los suelos cuanto más porcentaje de finos presentan, como es el caso de Nora, los valores calculados y experimentales más se aproximan. Para el caso de suelos con porcentajes en finos similares y curvas granulométricas extendidas continuas (Piedramuelle) y extendidas discontinuas (Ules), el porcentaje de variación es similar.

El porcentaje de variación de los valores calculados con la fórmula de Terzaghi y Peck (*opus cit.*), son significativamente más pequeños (independientemente que sean positivos o negativos), que los calculados con las fórmulas de los otros autores.

Los porcentajes de variación para los suelos de Ules y de Piedramuelle son muy parecidos entre sí y del orden del 90%, excepto con los calculados con la fórmula de Terzaghi y Peck (*opus cit.*).

## Conclusiones

Se han determinado en campo y laboratorio las propiedades índice de tres suelos del Municipio de Oviedo: en las proximidades del río Nora, en la zona de Ules y en la zona de Piedramuelle. A partir de ellas estos se han clasificado según el SUCS como: suelo de tipo aluvión (SC), coluvión (GM) y eluvión (SW), respectivamente.

	Variación ( $k_{exp}-k_{cal}/k_{exp}$ (%))		
	Nora	Ules	Piedramuelle
Slitcher	68,7	98,5	97,6
Terzaghi y Peck	-6,7	79,5	58,4
Hazen	40	94,2	95
Kozeny-Carman	40	95,4	92
Alyamani y Sen	-33,3	97,2	93,1

Tabla V. Porcentajes de variación de las permeabilidades determinadas.

A partir de los datos de permeabilidad determinada experimentalmente (en laboratorio), mediante el permeámetro de carga constante y teóricamente, mediante las fórmulas empíricas de Terzaghi y Peck (*opus cit.*), Hazen (*opus cit.*) y Slitcher (en Vukovic y Soro, *opus cit.*), los suelos estudiados presentan un intervalo que van desde  $0,05 \times 10^{-4}$  a  $30 \times 10^{-4}$  m/s. El suelo de Nora es el que presenta una permeabilidad menor, seguido del de Ules, siendo el más permeable el de Piedramuelle.

Todos los resultados obtenidos de la permeabilidad teórica son menores que los experimentales; esto se interpreta debido a que las fórmulas no tienen en cuenta los aspectos texturales y estructurales de los suelos. Los valores teóricos que más se aproximan a los experimentales son los obtenidos con la fórmula de Terzaghi y Peck (*opus cit.*), que considera parámetros tales como: porosidad,  $d_{10}$  y calibrado, mientras que las otras fórmulas aquí empleadas no consideran alguno de estos parámetros y de ahí su mayor diferencia con los experimentales.

Los valores de permeabilidad no solo están condicionados por los de porosidad (de manera directa, por ejemplo en el caso de Piedramuelle), sino también por la abundancia de finos, que se refleja cuantitativamente en los valores del límite líquido y el índice de plasticidad (presentan una relación inversa con la permeabilidad). Los porcentajes de variación de los valores teóricos respecto a los experimentales también están influenciados por la presencia de finos, de manera que a mayor cantidad de estos (por ejemplo en Nora) más cercanos están los valores teóricos y experimentales.

La presencia de partículas gruesas genera una porosidad más alta, pero la presencia de finos puede reducir este valor, ya que estos tienden a depositarse en los huecos generados y, por tanto, en estos casos, la permeabilidad está más condicionada por la abundancia de finos.

### Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Consejería de Empleo, Industria y Turismo del Gobierno del Principado de Asturias y al Fondo Euro-

peo de Desarrollo Regional FEDER por su subvención al proyecto FC-15-GRUPIN14-044.

### Referencias

- ALYAMANI, M. S., y SEN, Z. (1993): Determination of hydraulic conductivity from grain size distribution curves. *Groundwater*, 31: 551-555.
- BARR, D. W. (2001): Coefficient of permeability determined by measurable parameters. *Groundwater*, 39 (3): 356-361.
- BOADU, F. K. (2000): Hydraulic conductivity of soils from grain-size distribution: new models. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126: 739-746.
- CABALAR, A. F. y AKBULUT, N. (2016): Evaluation of actual and estimated hydraulic conductivity of sands with different gradation and shape. *SpringerPlus*, 5(1): 820.
- CASAGRANDE, A. (1948): Classification and identification of soils. *American Society of Civil Engineers*, 113: 901-991.
- CHAPUIS, R. P. (2012): Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils. a review. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71: 401-434.
- DAS, B. M. (2008): *Advanced soil mechanics*. Taylor & Francis, New York, 567 p.
- DE GROOT, D. J., OSTENDORF, D. W., y JUDGE, A.I. (2012): In situ measurement of hydraulic conductivity of saturated soils. *Geotechnical Engineering, Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 43(4): 63-72.
- GONZÁLEZ FERNÁNDEZ, B., MENÉNDEZ CASARES, E. y GUTIÉRREZ CLAVEROL (2004): Revisión y síntesis litoestratigráfica del sector occidental de la cuenca cretácica de Asturias. *Trabajos de Geología*, 24: 43-80.
- GUTIÉRREZ CLAVEROL, M. y TORRES ALONSO, M. (1995): *Geología de Oviedo*. Ediciones Paraíso, 276 p.

- HAZEN, A. (1892): Some physical properties of sands and gravel, with special reference to their use in filtration. 24<sup>th</sup> Annual report, Massachusetts state board of health, Pub. Doc., 34: 539-556.
- HOLTZ, R. D., KOVACKS, W. D. y SHEAHAN, T. C. (2011): *An introduction to Geotechnical Engineering*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, 853 p.
- JABRO, J. D. (1992): Estimation of saturated hydraulic conductivity of soils from particle size distribution and bulk density data. *American Society of Agricultural Engineers Journal*, 35 (2): 557-560.
- JULIVERT, M. (1967): La ventana del Río Monasterio y la terminación meridional del Manto del Ponga. *Trabajos de Geología*, 1: 59-76.
- KASENOW, M. (2010): *Determination of hydraulic conductivity from grain size analysis*. Water Resources Publications, LLC, Highlands Ranch, Colorado, 196 p.
- LOTZE, F. (1945): Zur Gliderung der Varisciden der Iberischen Meseta. *Geotekt. Forsch.*, 6: 78-92.
- MANUAL DE TIERRAS (1980): *Earth Manual*. United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Editorial Técnica Bellisco, 800 p.
- ODONG, J. (2007): Evaluation of empirical formulae for determination of hydraulic conductivity based on grain-size analysis. *Journal of American Science*, 3 (3): 54-60.
- SALARASHAYERI, A. F. y SIOSEMARDE, M. (2012): Prediction of soil hydraulic conductivity from particle-size distribution. *International Journal of Environment, Chemical, Ecological and Geophysical Engineering*, 6 (1): 16-20.
- TERZAGHI, K. y PECK, R. B. (1964): *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley and Son, New York.
- UNE 103-104 (1993): *Determinación de límite plástico de un suelo*. AENOR, 2 p.
- UNE 103-103 (1994): *Determinación de límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande*. AENOR, 10 p.
- UNE 103-302 (1994): *Determinación de la densidad relativa de las partículas de un suelo*. AENOR, 4 p.
- UNE 103-100 (1995): *Preparación de muestras para ensayos de suelos*. AENOR, 6 p.
- UNE 103-101 (1995): *Análisis granulométrico de suelos por tamizado*. AENOR, 10 p.
- UNE 7050-3 (1997): *Tamices y tamizado de ensayo. Parte 3: Exigencias técnicas y verificaciones de los tamices de ensayo de tela mecánica*. AENOR, 10 p.
- UNE 103-403 (1999): *Determinación de la permeabilidad de una muestra de suelo. Método de carga constante*. AENOR, 16 p.
- URUMOVIC, K. y URUMOVIC, Sr. K. (2014): The effective porosity and grain size relations in permeability functions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11: 6675-6714.
- VUKOVIC, M. y SORO A. (1992): *Determination of Hydraulic Conductivity of Porous Media from Grain Size Distribution*. Water Resources Publications, Littleton, Colorado.

