

Propiedades geotécnicas de la Formación La Argañosa (Cretácico Superior, Oviedo)

L. Pando^{(1), (2)}, M. Gutiérrez Claverol^{(1), (3)} y G. Flor-Blanco^{(1), (4)}

(1) Departamento de Geología, Universidad de Oviedo. Jesús Arias de Velasco s/n, 33005 Oviedo.

(2) lpando@geol.uniovi.es

(3) claverol@geol.uniovi.es

(4) gfb@geol.uniovi.es

RESUMEN

Se presenta la primera síntesis geotécnica de la Formación La Argañosa, unidad litoestratigráfica cretácica con poca calidad geomecánica bajo el núcleo urbano de Oviedo e importante acuífero regional. En este estudio son recopilados, tratados estadísticamente e interpretados parámetros geotécnicos de identificación y estado, así como físicos e hidráulicos, obtenidos en unos 400 ensayos de laboratorio y más de 250 pruebas de campo repartidos por la ciudad. La unidad, de naturaleza detrítica, está limitada a muro y techo por litologías calcáreas, y dominada por suelos y rocas muy blandas en alternancia de tramos granulares y cohesivos. Se analizan las principales propiedades que definen su comportamiento geotécnico: granulometría, plasticidad, resistencia, compactación, consistencia, compresibilidad, expansividad, colapsabilidad, permeabilidad, y agresividad química de los materiales y el agua. Se aportan valores numéricos de referencia, con interés orientativo para investigaciones futuras que se desarrollen sobre esta formación.

Palabras clave: Cretácico, Formación La Argañosa, geotecnia, Oviedo, suelos

Geotechnical properties of La Argañosa Formation (Upper Cretaceous, Oviedo)

ABSTRACT

It is performed the first geotechnical synthesis for La Argañosa Formation, the Cretaceous lithostratigraphic unit with very low geomechanical quality under the urban core of Oviedo; it also configures a major regional aquifer. In this study, geotechnical parameters of identification and condition, as well as physical and hydraulic ones, are compiled, statistically treated and interpreted. They were obtained from about 400 laboratory tests and more than 250 field tests around the city. The unit, of detrital origin, is bounded at the bottom and top by limestone lithologies, and is made up of soils and very soft rocks in alternating granular and cohesive layers. It discusses the main properties that define its geotechnical behavior: particle size distribution, plasticity, strength, compactness, consistency, compressibility, expansivity, collapsibility, permeability, and chemical aggressiveness of the materials and water. Furthermore, same numerical values are provided for reference forward guidance for future research to develop on this formation.

Key words: Cretaceous, engineering geology, La Argañosa Formation, Oviedo, soils

Introducción

En la ciudad de Oviedo, los problemas de índole geotécnica que surgen con mayor asiduidad están vinculados a materiales paleógenos —que componen mayoritariamente su subsuelo— de naturaleza lutítico-margosa y/o yesífera, y a sedimentos cuaternarios de origen aluvial (Pulgar *et al.*, 1999a; Pando *et al.*, 2004; Gutiérrez Claverol *et al.*, 2004; González-Nicieza *et al.*, 2008). Sin embargo, en la serie del Cretácico Superior subyacente destaca una unidad arenosa denominada Formación La Argañosa que presenta su propia problemática, ya que en buena parte del centro urbano se localiza a profundidades reducidas, resultando corta en excavaciones con frecuencia (Fig. 1).

Geotécnicamente está integrada por suelos y rocas muy blandas, con un comportamiento mecánico contrapuesto al de las unidades calcáreas que se sitúan a muro y techo, las formaciones San Lázaro y Oviedo respectivamente. Aunque no en todos los casos su naturaleza plantea dificultades constructivas, en numerosos vaciados para sótanos de inmuebles y aparcamientos subterráneos limita la profundidad a alcanzar, ante el sobrecoste económico que representa contener los taludes perimetrales y apoyar las estructuras en un sustrato con unas condiciones de estabilidad y capacidad portante sensiblemente minoradas respecto a las calizas adyacentes. Ello ha obligado, en diversas obras, a recurrir a soluciones de cimentación semiprofunda y losas, así como a ejecutar técnicas es-



Figura 1. Afloramiento de la Formación La Argañosa en las afueras de Oviedo (a), y excavación de un aparcamiento subterráneo que corta el techo de la unidad (b).

Figure 1. Outcrop of La Argañosa Formation in an outlying district of Oviedo (a), and excavation of an underground car park that through the top of this unit (b).

peciales de sostenimiento (muros pantalla, pantallas de pilotes y cortinas de micropilotes). A esto se suma que la Fm. La Argañosa forma parte de un acuífero de cierta entidad a escala regional —que posee además interés extractivo—, por lo que se encuentra saturada en gran parte de la ciudad. Esto ha precisado históri-

camente la necesidad de drenajes y bombeos; o, en circunstancias singulares, modificaciones de los proyectos para evitar fenómenos de subpresión y rebajamientos piezométricos potencialmente dañinos para las edificaciones del entorno.

A pesar de estas condiciones, las investigaciones para determinar cuantitativamente las características geotécnicas de la Fm. La Argañosa son mínimas, y de orientación más descriptiva que interpretativa (Gutiérrez Claverol y Torres Alonso, 1995; Pando, 2005). Ese trabajo surge, con un enfoque aplicado, como primera evaluación conjunta y a escala urbana de las principales propiedades que definen el comportamiento mecánico de la Fm. La Argañosa. Esta sinopsis geotécnica se aborda a través de la recopilación y tratamiento de datos de ensayos de laboratorio y pruebas de campo, procedentes de prospecciones desarrolladas en el área urbana e inmediaciones, y el análisis cualitativo de los parámetros geotécnicos obtenidos y sus variaciones. Simultáneamente se aportan valores numéricos y su representatividad estadística, con el propósito de que sirvan como referencia para estudios de reconocimiento del terreno o proyectos de edificación e ingeniería civil, en que se vea involucrada esta unidad en la ciudad y su entorno.

Marco geológico

La ciudad de Oviedo se asienta sobre la cuenca meso-cenozoica homónima, definiendo la terminación occidental de la Depresión Mesoterciaria Central de Asturias (Gutiérrez Claverol, 1972), que a su vez emplaza sobre un zócalo paleozoico fuertemente tectonizado perteneciente a la llamada Zona Cantábrica (Lotze, 1945; Julivert *et al.*, 1972). Dicha cuenca está configurada por una serie cretácica de unidades que alternan carácter silíceo y carbonatado, con edades comprendidas al menos entre el Aptiense y el Coniaciense (Fig. 2); sobre ella yace discordante mediante paleorrelieve, una cobertera paleógena fluvio-lacustre dominada por margas, lutitas y calizas, cuyo espesor supera localmente los 200 m (Truyols Santonja y García-Ramos, 1991). El recubrimiento cuaternario corresponde a sedimentos aluviales y, con menor abundancia, depósitos coluvionares. Los rasgos tectónicos que singularizan la cuenca guardan relación con la superposición de ciclos orogénicos y reactivación alpina de estructuras variscas (Alonso *et al.*, 1995; Pulgar *et al.*, 1999b); a nivel de deformación dúctil ésta adopta la geometría de un gran plegamiento, un sinclinal disimétrico con eje alineado aproximadamente en dirección este-oeste. Su flanco

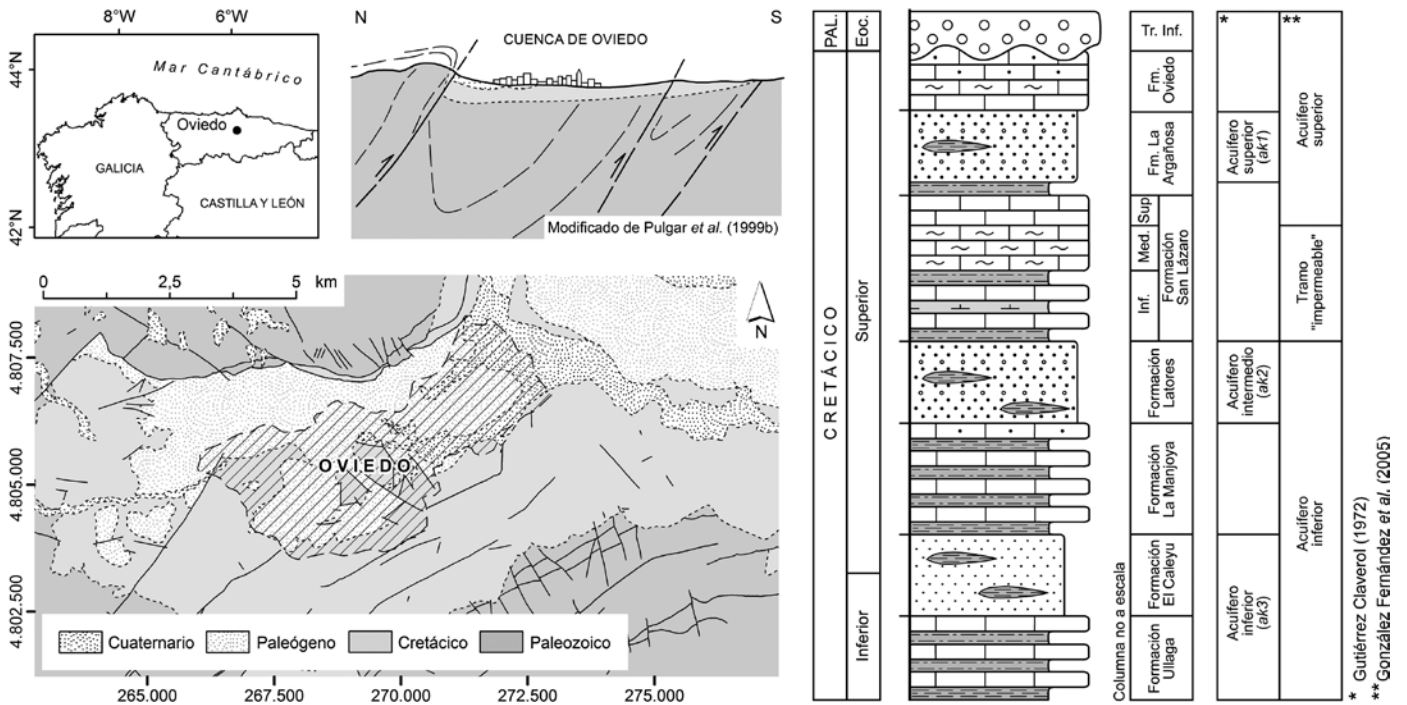


Figura 2. Marco geológico y niveles hidrogeológicos definidos en la serie mesozoica de la cuenca de Oviedo (basado en González Fernández et al., 2004 y 2005).

Figure 2. Geological setting and hydrogeological layers defined in the Mesozoic series of Oviedo basin (based on González Fernández et al., 2004 and 2005).

sur posee buzamientos suaves —inferiores a 20°—, mientras que el septentrional adquiere una disposición más verticalizada. Se reconocen asimismo varios sistemas de fallas subverticales, con rumbos NE-SO, NO-SE a NNO-SSE y E-O.

La Formación La Argañosa (de edad Turoniense-Coniaciense) constituye una unidad detrítica de naturaleza siliciclástica, cuyo estratotipo definió Bernárdez (1994) en los areneros —hoy desaparecidos— del barrio ovetense de La Ería, designación recusada por otros autores en favor de un topónimo con mejor representatividad geográfica (Olima, 1994; González Fernández et al., 2004). Vinculada a un ambiente deposicional estuarino (Bahamonde et al., 1984), está formada por niveles de arenas heterométricas de grano muy fino a muy grueso poco cementadas, de coloraciones blanquecinas, amarillentas, anaranjadas y grises, con potencias centimétricas a métricas; muestra asimismo habituales cambios laterales de facies e intercalaciones lentejonares de gravas, conglomerados y microconglomerados cuarcíticos, que se hacen más frecuentes a techo. En alternancias se disponen pasadas decimétricas de arcillas y limos versicolores —si bien de tonalidad gris-rojiza dominante—, con mayor presencia hacia muro, y que han sido objeto de explotación para cerámica. Su proporción de filosilicatos supera el 85%, con preeminencia de caolinita respecto a la illita, y algunos interestratificados illita-

esmectita (Gutiérrez Claverol y Torres Alonso, *op. cit.*). El espesor máximo de esta formación en gran parte de la cuenca, contrastado bajo la ciudad mediante sondeos, se fija en 35 a 40 m.

En el apartado hidrogeológico, González Fernández et al. (2005) establecen en la serie cretácica dos vastos sistemas acuíferos multicapa mixtos, integrados por alternancias de litologías detríticas y carbonatadas, independizados por un tramo intermedio muy poco permeable. El acuífero superior lo constituyen unos conglomerados basales paleógenos afectados por disoluciones, las calizas karstificadas de la Fm. Oviedo, los horizontes permeables de La Argañosa, y el miembro superior calcáreo de San Lázaro; el inferior estaría formado por las formaciones Latores, La Manjosa, El Caleyú y Ullaga (Fig. 2). Dentro del primero, la unidad estudiada configura a su vez un acuífero poroso multicapa, cuyo comportamiento está fuertemente condicionado por la orografía; mientras que en el margen meridional —zona de recarga— funciona en superficie libre con el nivel freático muy somero, el sellado a techo por parte de acuícludos paleógenos provoca su confinamiento hacia levante, terrenos topográficamente deprimidos. A nivel de composición química, las aguas contenidas en los acuíferos mesozoicos se clasifican como bicarbonatadas cálcicas o cálcico-magnésicas (Gutiérrez Claverol, *op. cit.*; IGME, 1984; Ortuño et al., 2004).

Metodología de trabajo

La distinción entre suelo y roca viene subordinada a una apreciación dual: el estado de agregación de las partículas y su comportamiento mecánico. Los límites resultan en la práctica difusos, la litificación de sedimentos blandos no implica necesariamente un desarrollo diagenético complejo; procesos como la autocompactación o —muy especialmente en el caso que nos ocupa— el cementado parcial de un depósito detrítico, derivan en toda una suerte de materiales de transición difíciles de clasificar. La resistencia a compresión uniaxial (σ_c) constituye entonces un criterio habitual de decisión, para lo cual la bibliografía recoge valores numéricos orientativos (González de Vallejo *et al.*, 2002); así, se adopta en este trabajo la diferenciación propuesta por la ISRM (1981) que fija el límite entre suelo y roca en 1 MPa. Con esta premisa, la Fm. La Argañosa —como se verá más adelante— resulta en conjunto asimilable a una unidad tipo litológica (IAEG, 1981), dominada por suelos arenosos y arcillosos (Fig. 3) y, en menor medida, rocas blandas y muy blandas cuando los anteriores alcanzan compacidades elevadas. Solo algunos horizontes de espesor decimétrico intercalados, con fuerte cementado, llegan a constituir rocas competentes. Su frecuencia aumenta hacia techo de la formación, y están favorecidos por la precipitación de carbonatos lixiviados del macizo rocoso suprayacente, en particular donde aflora y el desarrollo de su red de diaclasado ofrece mayor permeabilidad fisural a la infiltración de agua meteórica (p. ej., localizaciones de Santullano, La Ería, El Campón).



Figura 3. Apariencia de la Formación La Argañosa en testigos de sondeo. a) Arena micácea; b) Arena arcillosa; c) Arcilla de baja plasticidad; d) y e) Arena gruesa y microconglomerado cementados.

Figure 3. Appearance of La Argañosa Formation on borehole cores. a) Micaceous sand; b) Clayey sand; c) Low plasticity clay; d) and e) Cemented coarse grain sand and microconglomerate.

Con estos antecedentes, una caracterización geotécnica óptima requería por tanto condensar el mayor número posible de variables que condicionan el comportamiento mecánico de los distintos materiales. Para reunir un volumen de información cuantitativa representativo, se realizaron visitas de campo y una primera fase de acopio de datos, en gran medida pertenecientes a trabajos inéditos de reconocimiento del terreno para obras singulares, en que hemos venido participando los autores a lo largo de los últimos años; consistió en 134 muestras de laboratorio tomadas a diferentes profundidades en 61 perforaciones repartidas por la ciudad, que totalizan unos 400 ensayos de laboratorio respaldados por normativa de acreditación UNE (AENOR, 1999). Estos incluyeron la determinación de parámetros de identificación y estado, y propiedades físico-mecánicas. Los primeros comprenden: análisis granulométrico por tamizado, UNE 103.101:1995, y sedimentación, UNE 103.102:1995; límites de Atterberg, UNE 103.103:1994 y UNE 103.104:1993; contenido en carbonatos, UNE 103.200:1993; materia orgánica, UNE 103.204:1993; cualitativo y cuantitativo en sulfatos, UNE 103.202:1995 y UNE 103.201:1996; y quimismo del acuífero. A ello se suma la clasificación de los suelos según las dos propuestas de mayor difusión: USCS (*Unified Soil Classification System*) y AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Official*). Respecto a las propiedades físicas y mecánicas, se dispuso: humedad natural UNE 103.300:1993; densidad, UNE 103.301:1994; densidad relativa de las partículas, UNE 103.302:1994; resistencia a compresión simple en suelos, UNE 7.402:1988 y UNE 103.400:1993; corte directo (UU para finos y CD en granulares), UNE 103.401:1998; consolidación en edómetro, UNE 103.405:1994; e hinchamiento Lambe, UNE 103.600:1996. Esta información se complementó con datos de medida *in situ*, lo que incluyó 213 pruebas SPT (*Standard Penetration Test*) bajo procedimiento UNE 103.800:1992 y —su actualización— UNE EN ISO 22.476-3:2006, ejecutados en 81 sondeos diferentes; 28 registros de golpeo mediante penetrómetros dinámicos continuos Borro y DPSH (*Dynamic Probing Super Heavy*) —normas respectivas NLT 261 y UNE 103.801:1994—; presiómetros, y una veintena de ensayos de permeabilidad tipo Lefranc.

En una segunda etapa, en cada caso se efectuó la agrupación y síntesis de parámetros numéricos, con indicación de medidas estadísticas robustas para mostrar la distribución de ciertas variables, así como su representación en gráficos de diversa índole. Finalmente, en fase de interpretación se establece una valoración cualitativa apriorística de los resultados obtenidos.

Exposición y discusión de resultados

Parámetros de identificación y estado

En relación a la distribución granulométrica como una de las propiedades fundamentales que determina el comportamiento mecánico de un suelo, la Figura 4a representa una selección de curvas obtenidas por tamizado. Un examen preliminar permite establecer una primera distinción en suelos finos y gruesos; entendidos los últimos según USCS, como aquellos en que el porcentaje retenido por el tamiz de 0,074 mm (N.º 200 ASTM) excede el 50%. Atendiendo a la citada clasificación predominan entre ellos —siendo mayoritaria la fracción arenosa—, las clases SC, SM y SP; según AASHTO prevalecen A-1-a y A-1-b. En términos generales su proporción de gravas es muy variable, con máximos en torno al 20%, mientras que las partículas finas advierten una presencia significativa, de modo que en los SC/SM la mediana de su porcentaje alcanza el 34%; en los SP decae por debajo del 10%. Esto implica que cierta parte de los suelos gruesos

tendrán un comportamiento cohesivo, si se acepta la división habitual en la práctica geotécnica de que éste es asumible por encima del 35% de finos en peso. Esta buena graduación es cuantificable; en varias muestras de SP los valores de coeficiente de uniformidad —superior a cuatro— y curvatura —por encima de la unidad— así lo indican, con valores aún más altos en los SC/SM ($C_u > 40$; $C_c > 10$). En relación a la plasticidad obtenida mediante los límites de Atterberg, en la gráfica de Casagrande correspondiente a los suelos finos —con proporción de limo y arcilla superior al 50%— se ven representadas varias clases (Fig. 4b): arcillosos CL y CH, y limosos ML y MH; solo la cuarta parte del total de muestras registran alta plasticidad. Según AASHTO equivaldrían a A-4, A-6, A-7-5 y A-7-6. No se apreció ninguna tendencia de variación en profundidad de la plasticidad.

En lo referente a la composición química, casi la mitad de las 34 calcimetrías realizadas reportaron indicios de carbonatos, no excediendo el máximo del 11%, con promedios respectivos de 2,55 y 3,95% para suelos finos y gruesos (Tabla 1). En los niveles arcillosos no se detectó —para 18 análisis— materia orgánica, pero sí en los arenosos con una mediana por debajo del 0,5%; hay máximos puntuales por encima del 2%, si bien en muestras subsuperficiales por lo que están vinculados con seguridad a una edafización incipiente. Tanto en suelos cohesivos como granulares, solo en la cuarta parte de las pruebas —un total de 34— se localizaron indicios de sulfatos; en todo caso en concentraciones por lo general no agresivas según el criterio de la Instrucción de Hormigón Estructural (Ministerio de Fomento, 2008). Asimismo, la acidez Baumann-Gully —5 determinaciones— sitúa su máximo por debajo de 10, siendo especialmente baja en los niveles arcillosos.

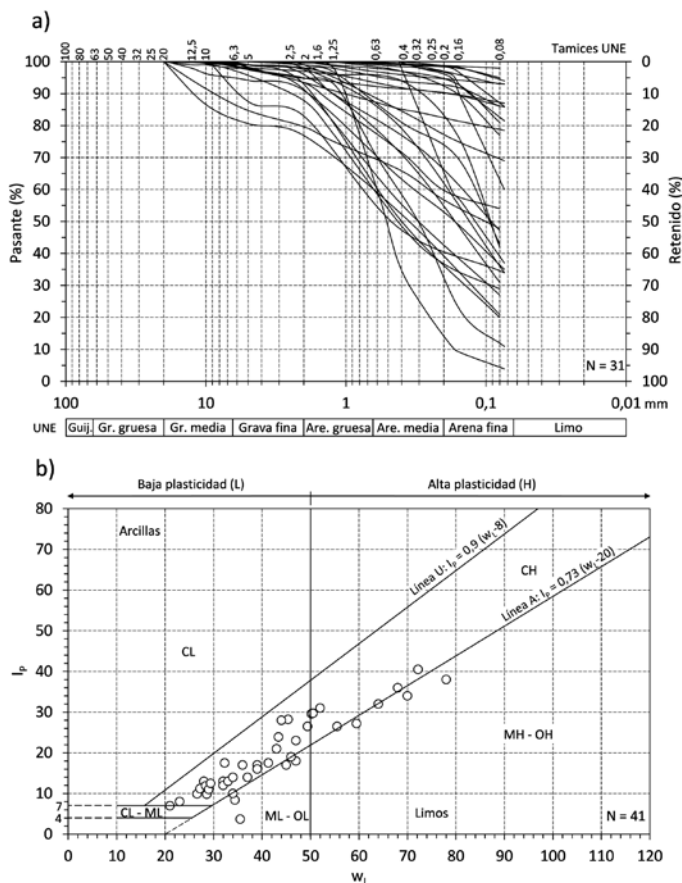


Figura 4. Curvas granulométricas obtenidas por tamizado (a) y carta de plasticidad para suelos finos (b).

Figure 4. Granulometric curves obtained from sieve analyses (a) and plasticity chart for fine soils (b).

Propiedades físicas y mecánicas de laboratorio

Los suelos finos poseen humedades naturales elevadas, en particular los CH y MH con medianas de 18 y 26% (Fig. 5a), aunque en distribuciones con fuerte asimetría y dispersión; a los suelos granulares en conjunto les corresponde un 13% —valor también alto y vinculado posiblemente a la significativa fracción arcillosa presente—, mientras que en los niveles de rocas blandas su valor desciende hasta el 9%. La densidad seca resulta particularmente baja para los términos de alta plasticidad, no rebasando 1,6 g/cm³ en promedio (Fig. 5b); sube hasta 1,86 g/cm³ en las arenas, y en las rocas blandas se sitúa en 2,13 g/cm³ (Tabla 1) para un coeficiente de variación reducido. La densidad de las partículas sólidas con 3 muestras fija 2,7 y 2,66 g/cm³ para materiales cohesivos y granulares respecti-

	w (%)	ρ (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	CO ₃ ²⁻ (%)	MO (%)	σ_c (MPa)	ϕ_u, ϕ' (°)	c_u, c' (kPa)
Suelos finos								
N	30	19	16	20		32	5	5
Máx	64,3	2,42	2,21	11		0,85	36,4	322,42
Mín	8,8	1,64	1	0		0,06	20,2	36,26
X	19,87	2,17	1,81	2,55		0,35	26,7	135,24
M	15,02	2,23	1,9	0		0,31	25,2	67,62
S	12,51	0,23	0,37	3,85		0,24	6,9	123,95
Cv	0,63	0,11	0,2	1,51		0,67	0,26	0,92
Suelos gruesos								
N	22	18	16	14	10	15	4	4
Máx	33,2	2,3	2,14	10,6	3,21	0,72	39,5	62,72
Mín	8	1,45	1,32	0	0	0,01	9,47	6,86
X	15,05	2,09	1,83	3,96	1,01	0,26	27,23	29,35
M	13,47	2,1	1,86	3,18	0,39	0,17	29,98	23,9
S	6,34	0,19	0,2	4,33	1,25	0,22	12,92	26,04
Cv	0,42	0,09	0,11	1,09	1,23	0,84	0,47	0,89
Rocas no competentes								
N	3	4	2			23	3	3
Máx	10,8	2,38	2,17			8,11	47,51	299,88
Mín	8,7	2,26	2,08			1,08	35,09	243,04
X	9,73	2,35	2,13			3,62	41,89	264,95
M	9,7	2,38	2,13			2,55	43,07	251,96
S	1,05	0,06	0,06			2,64	6,29	30,57
Cv	0,11	0,03				0,73	0,15	0,12

Tabla 1. Síntesis de propiedades físicas, químicas y resistentes para suelos y rocas.

Table 1. Summary of physical, chemical and mechanical properties for soils and rocks.

w = humedad natural; ρ = densidad aparente; ρ_d = densidad seca; CO₃²⁻ = contenido en carbonatos; MO = contenido en materia orgánica; σ_c = resistencia a compresión uniaxial; ϕ_u, ϕ' = ángulo de rozamiento interno no drenado/efectivo; c_u, c' = cohesión no drenada/efectiva; N = número de muestras; X = media aritmética; M = mediana (cuartil 2); S = desviación estándar; Cv = coeficiente de variación.

w = natural moisture content; ρ = bulk density; ρ_d = dry density; CO₃²⁻ = carbonate content; MO = organic matter content; σ_c = uniaxial compressive strength; ϕ_u, ϕ' = friction angle undrained/effective; c_u, c' = cohesion undrained/effective; N = number of samples; X = arithmetic mean; M = median (second quartile); S = standard deviation; Cv = coefficient of variation.

vamente. Teniendo en cuenta estos datos, el índice de huecos (e) en ambos casos se sitúa próximo a 0,45; lo cual dadas las humedades naturales citadas se tra-

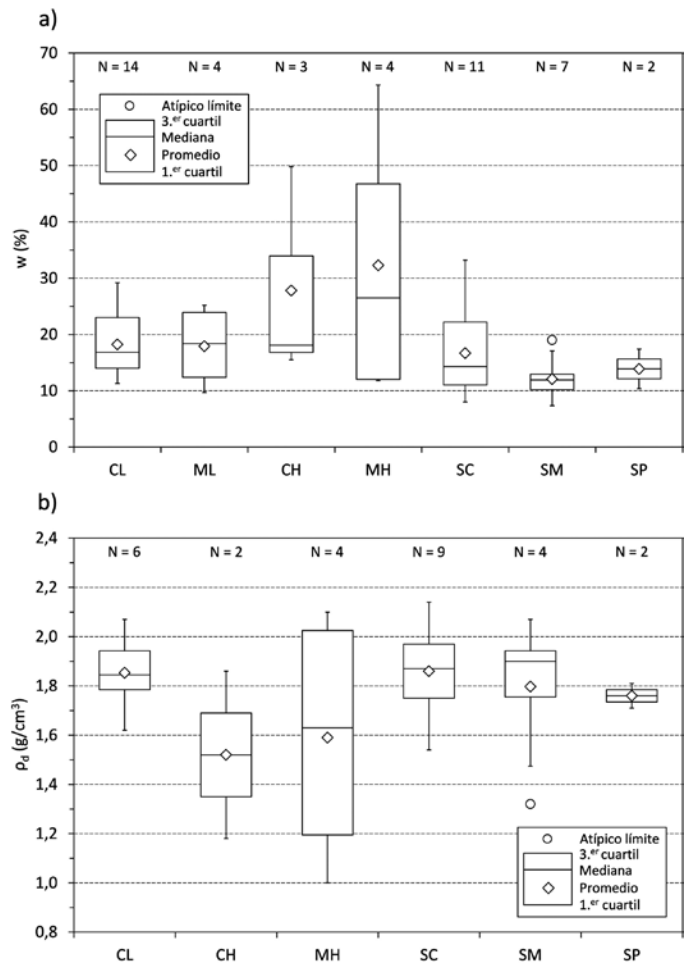


Figura 5. Humedad natural (a) y densidad seca (b) para diferentes suelos clasificados según USCS.

Figure 5. Natural moisture content (a) and dry density (b) for different soils classified according to USCS.

duce en un grado de saturación (S_v) superior al 98% para arcillas de baja plasticidad, y al 83% para arenas limosas. Puede concluirse que las arcillas y limos de baja plasticidad poseen mayor consistencia que sus equivalentes más plásticos; por su parte las arenas muestran, sin marcadas diferencias entre clases, una compacidad densa a medianamente densa.

Según su compresión simple, los suelos finos y gruesos abarcan el rango desde muy blandos a muy duros, con una marcada dispersión para ambas distribuciones (Cv>0,6), obteniéndose como mediana 0,3 MPa en arcillas y limos; y 0,17 MPa para las arenas (Tabla 1). Los términos de alta plasticidad ofrecen las resistencias más bajas —mediana en torno a 0,2 MPa (Fig. 6a)—, mientras que entre los granulares hay escasez de muestras a causa de las dificultades que plantean para el tallado de probetas, en particular los SP por su reducida proporción de fracción cohesiva. Por otro lado el análisis de la variación en profundidad de este parámetro para ambos tipos de materia-

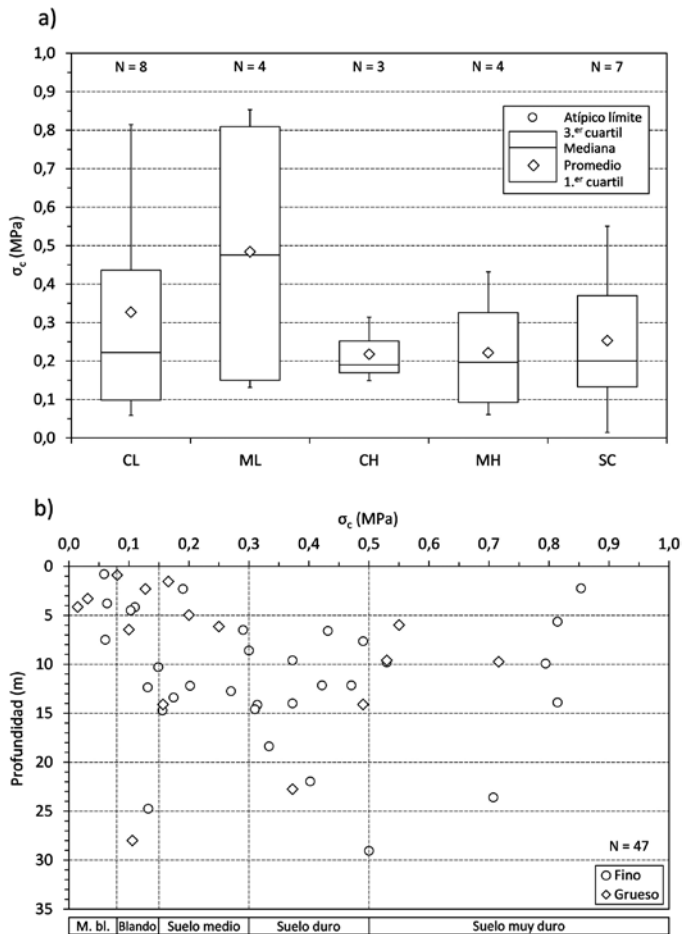


Figura 6. Resistencia a compresión uniaxial para los suelos según clase USCS (a), y variación de este parámetro con la profundidad (b).

Figure 6. Uniaxial compressive strength for soils according to USCS (a), and depth variation of this parameter (b).

les permite inferir una leve tendencia al incremento en profundidad, aunque evidente tan solo en los primeros 10-15 metros (Fig. 6b). En lo que refiere a la resistencia a esfuerzo cortante, las arcillas presentan una mediana de cohesión no drenada de 68 kPa, valor que indica una consistencia media a firme, mientras que las arenas aportan un ángulo de rozamiento efectivo promedio de 27°.

En el caso de las rocas blandas presentan una distribución de la resistencia a compresión muy asimétrica y de notable dispersión, con máximos de 8 MPa y una mediana de 2,5 MPa. No se encontraron diferencias reseñables a nivel de resistencia promedio entre las arcillosas y las arenosas. En corte directo las medianas de ángulo de rozamiento y cohesión se elevan a 43° y 251,96 kPa. De forma excepcional, dos muestras fuertemente cementadas por carbonatos, una arenisca de grano grueso y un microconglomerado, alcanzaron respectivamente 30 y 42,5 MPa en compresión uniaxial, este

último con un módulo de elasticidad longitudinal de 79 GPa y coeficiente de Poisson de 0,3 (norma UNE 22.950:1990, partes 1 y 3). Entre los nueve ensayos edométricos examinados, se obtuvieron para la curva de compresión noval índices de compresión muy elevados únicamente en dos muestras ($C_c > 0,3$), correspondientes a una arcilla de baja plasticidad y una arena arcillosa; el resto de resultados —en finos CL y ML, y arenas SC y SM— definen compresibilidades medias y bajas ($C_c < 0,15$; Bell, 2000). Sin ensayos que lo refrenden, pero atendiendo a su límite líquido, cabe esperar mayor susceptibilidad a la consolidación por parte de los términos muy plásticos, en particular los MH. Paralelamente, en las muestras de suelos CL (en número de 3) se comprobó que la relación lineal $C_c = 0,009 \cdot (w_L - 10)$ recomendada para arcillas normalmente consolidadas (Terzaghi y Peck, 1967) ajusta aceptablemente, con una sobreestimación promedio de la compresibilidad inferior al 20%.

En condiciones normales, raramente se recurre a ensayos específicos de hinchamiento para caracterizar este nivel geológico. El único disponible, de tipo Lambe, se realizó al observar en edómetro la expansión incipiente de una muestra saturada; su resultado fue “no crítico”. Ante la ausencia de más datos, la Figura 7a estima el hinchamiento potencial de los finos sobre la propuesta basada en la plasticidad de Oteo (1986). Sitúa los materiales más habituales —poco plásticos— como de nula a baja expansividad, las dos únicas muestras con una capacidad significativa corresponden a limos MH. De forma complementaria, también se confirmó este planteamiento a partir de información granulométrica a través del concepto de actividad (Skempton, 1953), variable que representa el cociente entre el índice de plasticidad y el porcentaje de fracción arcillosa (<2 μm). Su determinación en tres suelos clase CL con proporciones de arcilla entre el 30 y el 45%, reportó valores extremos de 0,33 y 0,59, dentro el rango habitual para minerales arcillosos inactivos, lo que concuerda con una composición en que domina la caolinita. En lo referente a la colapsabilidad, a falta de ensayos concretos se evalúa mediante otro criterio aproximado, según el cual los suelos con límite líquido moderado a elevado y peso específico bajo, son más proclives a sufrir colapso en condiciones saturadas (Gibbs y Bara, 1967). Así, se califican como no colapsables, presentando mayor susceptibilidad las arenas arcillo-limosas que los finos de baja y alta plasticidad (Fig. 7b).

Ensayos in situ

En los suelos finos, el 57% de las 52 pruebas SPT realizadas alcanza el rechazo, y tres de cada cuatro indi-

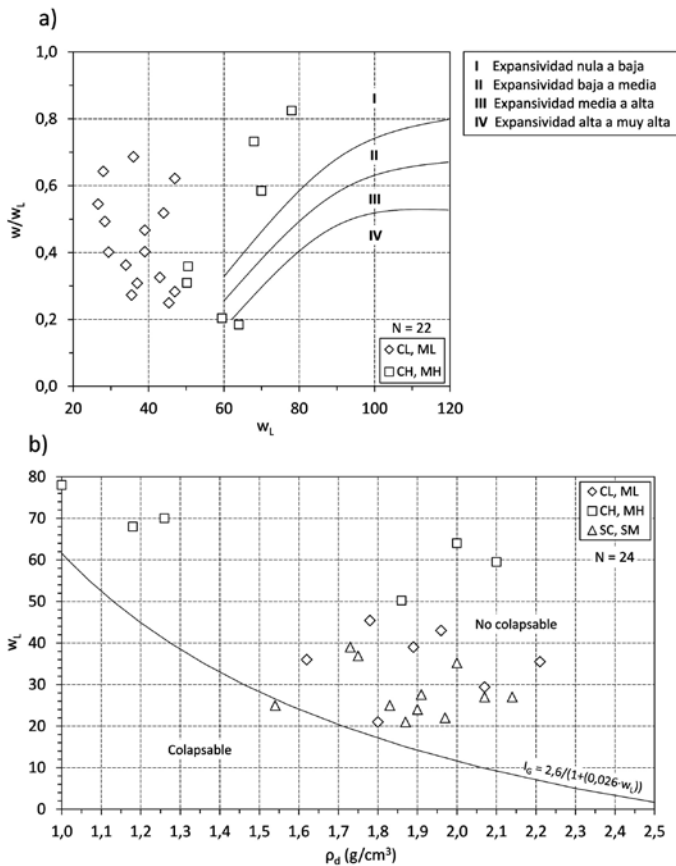


Figura 7. Evaluación del potencial expansivo de muestras cohesivas (a) y colapsabilidad de los suelos (b).
Figure 7. Evaluation of the expansive potential for cohesive samples (a) and collapsibility of soils (b).

can una consistencia dura ($N_{SPT} > 30$). En profundidad se aprecia un aumento progresivo de su resistencia en los 10 metros iniciales, tendencia con alguna variación pero reafirmada en que todas las pruebas por debajo de 15 m finalizaron con rechazo (Fig. 8). Sobre materiales gruesos, más del 80% de los 161 ensayos excedieron un golpeo de 50 —compacidad muy densa—, aunque gran parte de los rechazos están causados por niveles con gravas y cantos. No se percibe un incremento manifiesto de la resistencia en profundidad en los niveles friccionales sino una alternancia de compacidades. Las pruebas presiométricas (7) tampoco muestran aumento de la capacidad resistente al profundizar, ofreciendo un intervalo de variación de E_p para los suelos granulares de entre 10 y 40 MPa.

Finalmente, en esta formación los penetrómetros dinámicos continuos se destinan a identificar variaciones en la compacidad o reconocer cambios en la distribución granulométrica. En los registros de golpeo íntegramente desarrollados dentro de la unidad, emplazados en el entorno del Parque de Invierno y los vecindarios de San Lázaro, Otero, Villafría y Fozaneldi,

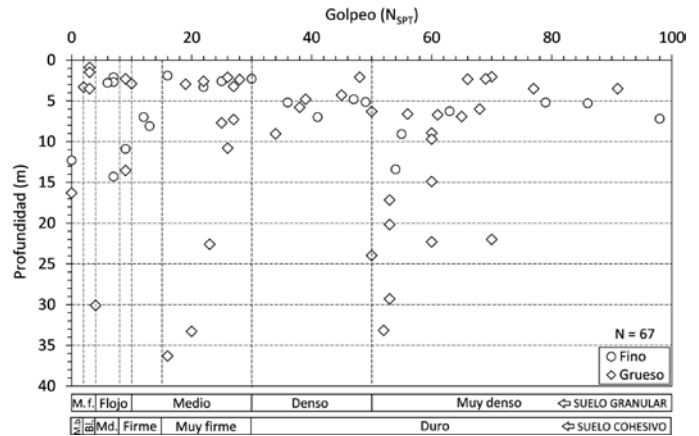


Figura 8. Variación de N_{SPT} con la profundidad para suelos finos y gruesos.
Figure 8. N_{SPT} variation with depth for fine and coarse soils.

se observó que el rango intercuartílico de profundidades de rechazo está acotado entre 2,5 y 7,5 m, con una mediana de 5 metros, sin que el patrón de N_{20} responda de ordinario a un aumento paulatino sino a fluctuaciones. Se advierte no obstante la influencia añadida de dos efectos, por un lado incrementos o picos localizados de golpeo debidos no a la compacidad sino a horizontes de gravas y cantos intercalados en la serie o, en menor medida, a niveles cementados; por otro la reducción —menos evidente— que experimenta N_{20} en materiales granulares uniformes emplazados bajo el nivel freático.

Propiedades hidráulicas

En una unidad que se encuentra a menudo saturada, hay dos condicionantes que adquieren relevancia geotécnica: la conductividad hidráulica de los materiales y la agresividad química de las aguas. El examen de ensayos *in situ* tipo Lefranc permite acotar de modo preliminar algunos valores de referencia, que ilustran numéricamente la independización de subacuiferos de control piezométrico local vinculados a la compartimentación vertical de la permeabilidad causada por la alternancia de granulometrías, apuntada por Gutiérrez Claverol y Pando (2008). Los ensayos en suelos gruesos con menor concentración de finos (<10%), principalmente de clase SP, aportan los coeficientes más altos medidos —tres determinaciones— con valores entre $4,3 \times 10^{-5}$ y $1,81 \times 10^{-4}$ m/s para arenas con predominio de grano fino a grueso respectivamente; esto se traduce en una capacidad de drenaje moderada. Como elemento de contraste, se aplicó la fórmula de Hazen (Jiménez Salas y Justo Alpañés, 1975) que emplea el diámetro efectivo —primer decil— de la curva granulométrica, arrojando para dos suelos de

arena mal graduada una permeabilidad teórica media de $1,85 \times 10^{-4}$ m/s, lo que concuerda con los valores experimentales. Por su parte, en niveles arenosos enriquecidos en arcillas y limos (SC y SM) este parámetro desciende hasta dos o tres órdenes de magnitud, obteniéndose sobre una población de 11 pruebas una mediana de $4,4 \times 10^{-7}$ m/s, lo que corresponde a un acuífero pobre. Para delimitar un valor mínimo de coeficiente en estos suelos, de nuevo mediante la propuesta de Hazen, para dos muestras con porcentajes elevados de fracción fina (>40%) se calculó una permeabilidad de $6,5 \times 10^{-8}$ m/s. Este resultado evidencia un potencial de drenaje muy bajo característico ya de horizontes acuitardos, comportamiento que se atribuye a falta de datos de campo, como mínimo, a los horizontes de arcillas; si bien habida cuenta que en las muestras de finos CL el valor de D_{10} es muy bajo (<1 μm), su conductividad hidráulica será más cercana a la de acuícludos.

En relación al quimismo del acuífero, fueron seleccionadas 14 muestras tomadas en distintos puntos de la ciudad para evaluar su agresividad según la EHE. Se trata de aguas con ligera basicidad, en las que el contenido en amonio —variable con mayor dispersión— y CO_2 agresivo ofrecen medianas de 0,4 y 2 mg/l (Fig. 9), valores alejados de la proporción mínima crítica para estos parámetros (15 ppm); al igual ocurre con el ión magnesio, con una concentración de mediana 9,95 mg/l para un límite de 300 ppm. En cuanto al residuo seco la mediana se establece en 380 ppm; en una única analítica situó su valor por debajo de 150 mg/l, equivalente a un ataque débil. Finalmente la proporción de sulfatos también resulta reducida, con una mediana de 33,89 ppm, siendo en todas las muestras inferior al máximo establecido para el

consumo humano —250 mg/l— (RD 140/2003 de 7 de febrero).

Conclusiones

Este trabajo desarrolla la primera caracterización cuantitativa y cualitativa de las propiedades geotécnicas más relevantes de la Fm. La Argañosa, sobre la base de un registro de ensayos de laboratorio —bajo normas UNE— y de campo, integrado por más de 650 pruebas.

En la unidad prevalecen los suelos y, en menor medida, rocas muy blandas; la presencia de rocas duras queda restringida a niveles intercalados de fuerte cementado. Se observa una alternancia reiterada de suelos gruesos y finos; entre los primeros predominan las clases SC, SM y SP (según USCS), con tendencia a una buena graduación, mientras que tres cuartas partes de los finos son de baja plasticidad CL (más frecuente) y ML, el resto pertenecen a los grupos CH y MH. Su contenido habitual en humedad natural es elevado —excede el 18% de mediana— y particularmente alto en los de alta plasticidad quienes, a su vez, reportan los valores medios de densidad seca más reducidos, inferiores a $1,6 \text{ g/cm}^3$. Simultáneamente, su consistencia disminuye frente a sus equivalentes menos plásticos. Respecto al análisis químico de los suelos, el promedio de carbonatos y materia orgánica es inferior a 4 y 0,5% respectivamente, y la concentración de sulfatos y grado de acidez determinan una agresividad despreciable frente al hormigón estructural.

Geomecánicamente la formación engloba suelos desde muy blandos a muy duros, obteniéndose para la compresión uniaxial medianas correspondientes de 0,31 y 0,17 MPa en los tramos finos y gruesos. Entre los primeros, los términos de alta plasticidad ofrecen las menores resistencias. Las rocas blandas por su parte alcanzan una mediana de 2,5 MPa. La compresibilidad de los suelos finos resulta media a baja en la mayor parte de casos ($C_c < 0,15$), aunque se identifican algunas muestras con alta susceptibilidad a la consolidación, mientras que la expansividad es nula a baja, deduciéndose cierto potencial para los limos de alta plasticidad. En términos generales se trata de materiales no colapsables. En campo, a través de ensayos de penetración, los suelos cohesivos presentan una consistencia alta ($N_{\text{SPT}} > 30$), y un incremento de su resistencia hacia techo de la formación confirmado mediante los valores de compresión simple. La compacidad de los suelos gruesos varía ostensiblemente, como demuestra la variación de N_{20} en los penetrómetros continuos, estando sobrevalorado el golpeo a causa sobre todo de los niveles de gravas y cantos.

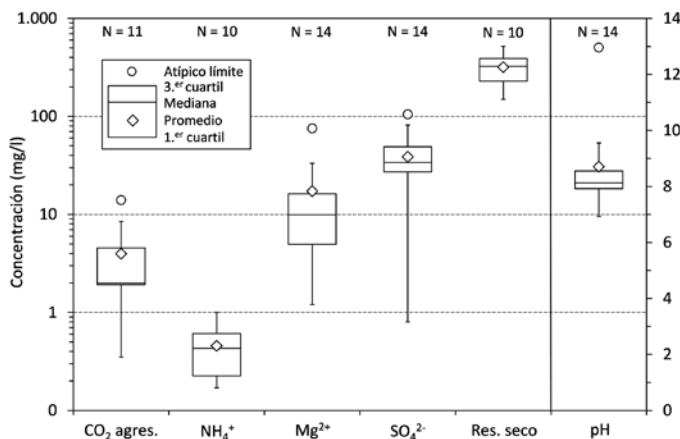


Figura 9. Parámetros físico-químicos que definen la agresividad química del acuífero de la Fm. La Argañosa conforme a los criterios de la EHE.

Figure 9. Physicochemical parameters that define the chemical aggressiveness of La Argañosa Formation aquifer according to EHE criteria.

Hidráulicamente, la diferenciación granulométrica comporta coeficientes de permeabilidad comprendidos al menos entre 10^{-4} y 10^{-8} m/s, lo que se traduce en una alternancia vertical de horizontes acuíferos, acuitados y acuíclados que facilita la habilitación de subacuíferos. Respecto al contenido químico, y en condiciones naturales no contaminadas, las aguas que aloja esta unidad no resultan agresivas para el hormigón estructural según la normativa vigente.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido parcialmente financiada por el Gobierno del Principado de Asturias, conforme al Plan de Ciencia, Tecnología e Innovación 2006-2009, como parte de los contenidos desarrollados en la Tesis Doctoral del primer firmante. Los autores muestran su gratitud a las empresas que han cedido, desinteresadamente, información inédita para este trabajo; datos cuya procedencia y localización se omite bajo compromiso de confidencialidad. Se agradece asimismo a Luis I. González de Vallejo y otro revisor anónimo, las observaciones efectuadas sobre el primer manuscrito.

Referencias

- AENOR 1999. *Geotecnia. Ensayos de campo y de laboratorio*. AENOR N.A. 71.970, Madrid, 385 pp.
- Alonso, J.L., Pulgar, J., García-Ramos, J.C. and Barba, P. 1995. Tertiary basins and Alpine tectonics in the Cantabrian mountains (NW Spain). En: Friend, P.F. y Dabrio C. (Eds.), *Tertiary Basins of Spain. Tectonics, climate and sea-level changes*. Cambridge University Press, 214-227.
- Bahamonde, J., Colmenero, J.R. y Vera, C. 1984. Facies sedimentarias del Cretácico de los alrededores de Oviedo. *Publicaciones de Geología (Universidad Autónoma de Barcelona)*, 20, 109-119.
- Bell, F.G. 2000. *Engineering properties of soils and rocks*. Blackwell Science Ltd., 484 pp.
- Bernárdez, E. 1994. Unidades litoestratigráficas del Cretácico de la Depresión central asturiana. *Cuadernos de Geología Ibérica*, 18, 11-26.
- Gibbs, H. and Bara, J. 1967. Predicting Problems of Collapsing Soil. *Journal of Soils Mechanics and Foundation Division ASCE*, 93 (SM4), 577-594.
- González de Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. 2002. *Ingeniería Geológica*. Pearson Education, Madrid, 715 pp.
- González Fernández, B., Gutiérrez Claverol, M. y Menéndez Casares, E. 2005. Caracterización hidrogeológica de la sucesión cretácica en el sector central de Asturias (Oviedo, NO de España). *Boletín Geológico y Minero*, 116 (3), 231-245.
- González Fernández, B., Menéndez Casares, E., Gutiérrez Claverol, M. y García-Ramos, J.C. 2004. Litoestratigrafía del sector occidental de la cuenca cretácica de Asturias. *Trabajos de Geología (Universidad de Oviedo)*, 24, 43-80.
- González-Nicieza, C., Álvarez-Fernández, M^a.I., Álvarez-Vigil, A.E. and Menéndez-Díaz, A. 2008. Forensic analysis of foundation failure in gypsiferous ground. *Engineering Failure Analysis*, 15, 736-754.
- Gutiérrez Claverol, M. 1972. *Estudio geológico de la Depresión Mesoterciaria Central de Asturias*. Tesis Doctoral, Univ. de Oviedo (inédita), 5 tomos.
- Gutiérrez Claverol, M. y Pando, L. 2008. Niveles permeables en el contexto geotécnico del subsuelo de Oviedo. *GeoTemas*, 10, 931-934.
- Gutiérrez Claverol, M. y Torres Alonso, M. 1995. *Geología de Oviedo. Descripción, recursos y aplicaciones*. Paraíso, Oviedo, 276 pp.
- Gutiérrez Claverol, M., Torres, M., Pando, L. and González, B. 2004. Ground subsidence and collapse in subsoil of Oviedo city owing to karstified gypsum levels. *32nd International Geological Congress, Abstracts, part. 1*, Florencia, pp. 196.
- IAEG 1981. Rock and soil description and classification for engineering geological mapping. Report by the IAEG Commission on Engineering Geological Mapping. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 24, 235-274.
- IGME 1984. *Calidad de las aguas subterráneas en la Cuenca Norte (Asturias)*. Informes. Servicio de Publicaciones, Ministerio de Industria, Madrid, 53 pp.
- ISRM 1981. *Rock characterization testing and monitoring ISRM suggested methods*. E.T. Brown, Pergamon Press, London, 211 pp.
- Jiménez Salas, J.A. y Justo Alpañés, J.L. 1975. *Geotecnia y Cimientos I. Propiedades de los suelos y de las rocas*. Rueda, Madrid, 466 pp.
- Julivert, M., Fontboté, J.M., Ribeiro, A. y Conde, L. 1972. *Mapa tectónico de la Península Ibérica y Baleares*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 113 pp.
- Lotze, F. 1945. Zur Gliderung der Varisziden der Iberischen Meseta. *Geotektonische Forschungen*, 6, 78-92.
- Ministerio de Fomento 2008. *Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)*. Real Decreto 1.247/2008 de 18 de julio. Publicado en BOE de 22 de agosto de 2008.
- Olima, O. 1994. *Estratigrafía y sedimentología de las series cretácicas entre Oviedo y Pola de Siero (Asturias)*. Trabajo de Investigación, Dpto. de Geología, Univ. de Oviedo (inédito).
- Ortuño, A., Meléndez, M. y Rodríguez, M.L. 2004. Relación entre litología y características hidroquímicas de las aguas subterráneas. Red de Control de la Calidad del Principado de Asturias. *Boletín Geológico y Minero*, 115 (1), 35-46.
- Oteo, C. 1986. Las arcillas expansivas en España: distribución y propiedades. *Curso sobre cimentaciones en terrenos metaestables, colapsables y expansivos*, 2, 1-20.
- Pando, L. 2005. *Revisión y nuevas aportaciones al conocimiento geotécnico del subsuelo urbano de Oviedo*. EPS Guillermo Schulz, Univ. de Oviedo (inédito), 134 pp.

- Pando, L., Gutiérrez Claverol, M., Torres, M. y Martínez, F. 2004. Los materiales yesíferos del Terciario de Oviedo y su problemática geotécnica. *Geo-Temas*, 6 (3), 305-308.
- Pulgar, J.A., Gutiérrez Claverol, M. y Torres Alonso, M. 1999a. Constitución geológica y características geotécnicas del subsuelo urbano de La Tenderina-Ventanielles (Oviedo). *Trabajos de Geología (Universidad de Oviedo)*, 21, 295-307.
- Pulgar, J.A., Alonso, J.L., Espina, R.G. y Marín, J.A. 1999b. La deformación alpina en el basamento varisco de la Zona Cantábrica. *Trabajos de Geología (Universidad de Oviedo)*, 21, 283-294.
- Skempton, A.W. 1953. The colloidal activity of clay. *Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and foundation engineering*, 1, 57-61.
- Terzaghi, K. and Peck, R.B. 1967. *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley and Sons, Inc., New York, 729 pp.
- Truyols Santonja, J. y García-Ramos, J.C. 1991. El Terciario de la cuenca de Oviedo y el yacimiento de vertebrados de Llamaquique. *Boletín de Ciencias de la Naturaleza, RIDEA*, 41, 77-99.

Recibido: junio 2011
Revisado: agosto 2011
Aceptado: octubre 2011
Publicado: enero 2012

