

# Propiedades geotécnicas de los sedimentos de la laguna Altillo Chica (Toledo): implicación en la formación de estructuras de erosión

*Geotechnical properties of the sediments of the Altillo Chica playa lake (Toledo): implication in the formation of groove marks*

Álvaro Pulmariño Martín, Meaza Tsige y M. Esther Sanz Montero

Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid. 28040 Madrid.  
alpulmar@ucm.es, meaza@geo.ucm.es, mesanz@geo.ucm.es

## ABSTRACT

*Altillo Chica is a playa lake, located in Lillo (Central Spain), where long trails are left behind by rocks up to several centimetres in size, as they move across the bed. The mechanisms of formation of these sedimentary structures (groove marks) are still controversial. In this work the physical, structural and resistant properties of the sediment that could explain the formation of these structures are studied. The sediment, which is characterized as silt sized gypsum, has high resistance parameters that do not justify by themselves the movements of objects on surfaces with very low slopes. The high shear stress of these sediments can be related to the high hygroscopic humidity and suction.*

**Key-words:** *playa lake, sailing stones, shear stress, clay.*

## RESUMEN

*En el lecho de la laguna de Altillo Chica, situada en el municipio manchego de Lillo, se observan trazas, a modo de surco, dejadas por materiales pétreos, de distintos tamaños, al desplazarse. El origen de estas estructuras de erosión (groove marks) en superficies tan llanas todavía es controvertido. En este trabajo se estudian las propiedades físicas, estructurales y resistentes del sedimento lagunar que pudieran justificar la formación de dichas estructuras. El sedimento, que se ha caracterizado como limo yesífero, presenta unos parámetros resistentes muy elevados que no justifican por sí solos los movimientos de los bloques en pendientes tan bajas. Los elevados valores de resistencia pueden deberse a la humedad higroscópica y capacidad de succión de estos depósitos.*

**Palabras clave:** *lago salado efímero, piedras navegantes, resistencia al corte, arcilla.*

*Geogaceta*, 66 (2019), 139-142  
ISSN (versión impresa): 0213683X  
ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 1 de febrero de 2019  
Revisión: 25 de abril de 2019  
Aceptación: 24 de mayo de 2019

## Introducción

En algunas lagunas someras y efímeras que se secan durante prolongados periodos de tiempo (*playa lake*), se observan unas estructuras sedimentarias de erosión (*groove marks*) que consisten en largas trazas, dispuestas a modo de surco, dejadas tras de sí por rocas y otros objetos, al arrastrarse sobre el lecho llano de esas lagunas (Fig. 1A). Estas "piedras viajeras" o "piedras navegantes" (*sailing stones*) pueden ser de gran tamaño y, aun así, dejan largas trazas que pueden cambiar repetidamente de dirección (Sanz Montero *et al.*, 2015). Este proceso fue descrito inicialmente por McAllister y Agnew (1948) en una laguna efímera llamada Racetrack Playa (California, EEUU), donde se reconocen estructuras de

gran espectacularidad, pero también se han registrado más esporádicamente en otras *playas* del SO de EEUU (Rodríguez Aranda y Sanz Montero, 2016).

Más recientemente, estructuras de similares características se han descrito también en La Mancha toledana (Fig. 1), concretamente en la laguna de Altillo Chica y otras lagunas del humedal de Lillo (Sanz Montero y Rodríguez Aranda, 2013; Sanz Montero *et al.*, 2015). Rodríguez Aranda y Sanz Montero (2016) resumen las variadas interpretaciones que se han dado a lo largo del tiempo para explicar el proceso. Solamente existen dos aspectos sobre los que hay consenso: el viento es un agente imprescindible y que el movimiento se realiza mediante un deslizamiento sobre un sedimento húmedo.

En los últimos años, incluso, se han realizado estudios en directo del movimiento en Racetrack (Norris *et al.*, 2014) y en Lillo (Sanz Montero *et al.*, 2016). Los primeros sostienen que las rocas se mueven empujadas por placas de hielo flotantes que se desplazan cuando sopla el viento. En el caso de Lillo se propone que los objetos se deslizan por el fondo, al ser empujados por las corrientes de agua que se producen, por la acción del viento en episodios tormentosos. En esta situación, la presencia de tapices microbianos bentónicos favorece el movimiento (Sanz Montero y Rodríguez Aranda, 2013).

A pesar del papel fundamental que juega el lecho en la formación de estas estructuras, las propiedades geotécnicas del sedimento no se han estudiado en profundidad.

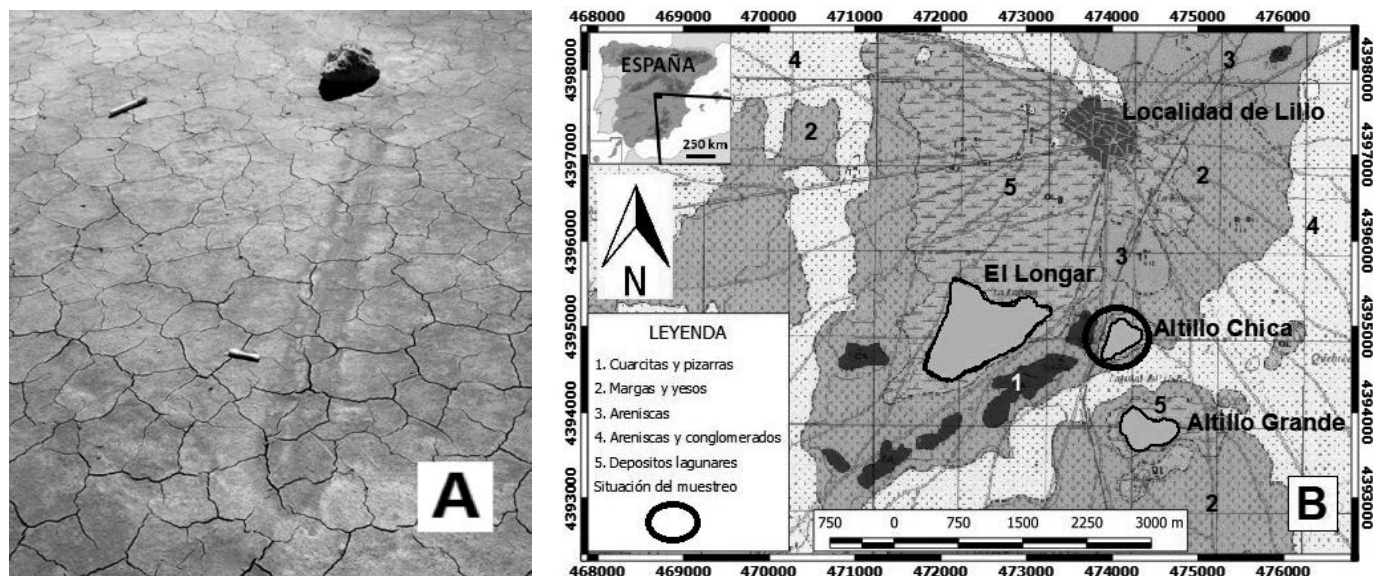


Fig 1.- A) Trazas dejadas tras sí por una roca en la laguna de Altillo Chica. B) Mapa geológico de la zona de Lillo (Arandilla Mena et al., 1976). Ver figura en color en la web.

Fig 1.- A) Tracks left behind by a rock in the Altillo Chica playa lake. B) Geological map of the Lillo area (Arandilla Mena et al., 1976). See color figure in the web.

Para cubrir esta carencia, en este trabajo se analizan el comportamiento geotécnico, la microfábrica y la mineralogía de los depósitos lagunares recientes de la laguna Altillo Chica (Lillo, Toledo). Esta se asienta encima de unos materiales margo-yesíferos de edad Mioceno integrados en la zona sur de la Cuenca Cenozoica del Tajo (Fig. 1B). La naturaleza del sustrato condiciona la hidroquímica salina de la laguna y la precipitación de evaporitas durante los meses más áridos (Cabestrero y Sanz Montero, 2018).

**Metodología**

*Composición mineralógica y propiedades físicas*

Para este estudio se recogieron un total de 20 muestras representativas del lecho lagunar (Tabla I).

Para determinar la mineralogía total y de la fracción de arcilla, se llevaron a cabo análisis de difracción de rayos X (DRX) en 2 de las muestras. La mineralogía total se obtuvo mediante difracción en polvo por trituración, molida y tamizado por el tamiz <math>53\mu\text{m}</math>. Para la determinación de la mineralogía de las arcillas, también a través de difracción de rayos X, se prepararon tres agregados orientados (AO) por cada muestra (AO, AO+EG y AO+550°). Todos estos análisis se realizaron en el CAI, Centro de Apoyo a la Investigación, de la Facultad de Ciencias Geológicas (UCM). Además, se realizaron observaciones mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) para analizar la microestructura del material.

Por otra parte, y siguiendo las correspondientes normativas UNE, se han realizado ensayos geotécnicos para determinar la densidad ( $\rho$ ), humedad natural e higroscópica ( $w$ ), distribución granulométrica y límites de Atterberg de los sedimentos de la superficie. Las relaciones de fase que se pudieron establecer con los resultados de humedad y densi-

dad, ha permitido determinar el índice de poros ( $e$ ), el grado de saturación para el estado inicial del suelo y la actividad ( $A_c = IP / >2\mu\text{m}$ ) de la fracción arcillosa. Todos los ensayos han sido realizados en el laboratorio de Ingeniería Geológica del departamento de Geodinámica, de la Facultad de Ciencias Geológicas, UCM.

*Parámetros resistentes*

Los parámetros resistentes se han obtenido mediante la programación de 5 ensayos de corte directo, tanto en muestras inalteradas como en remoldeada (energía del Proctor Normal). Las condiciones han sido de tipo consolidado y drenado (CD), y se han realizado con diferentes humedades: humedad natural ( $w$ ), humedad de límite plástico (LP) y humedad de límite líquido (LL), para observar las variaciones de la resistencia con el estado de consistencia del sedimento. Las muestras se han ensayado con esfuerzos normales ( $\sigma_n$ ) bajos (25, 50 y 100 kPa). El ensayo se ha realizado a velocidad lenta (0,03 mm/min) para permitir la disipación de los excesos de presión de poros.

**Resultados y discusión**

La composición mineralógica está representada por yeso (hasta 80%) y por filossilicatos y otras sales, en muchos casos, hidratadas. Del Buey et al. (2018)

Muestra	Tipo	Prof. (m)
ALT-C-1	Alterada	0-0,2
ALT-C-2	Alterada	0-0,2
ALT-C-3	Alterada	0-0,2
ALT-C-4	Alterada	0-0,2
ALT-C-5	Alterada	0-0,2
ALC-1	Alterada	0-0,2
ALC-2	Alterada	0-0,2
ALC-3	Alterada	0-0,2
ALC-4	Alterada	0-0,2
ALC-5	Alterada	0-0,2
ALC-6	Alterada	0-0,2
S-1	Inalterada	0-0,2
S-2	Inalterada	0-0,2
S-3	Inalterada	0-0,2
S-4	Inalterada	0-0,2
S-5	Inalterada	0-0,2
S-6	Inalterada	0-0,2
S-7b-1	Inalterada	0,2-0,4
S-7b-2	Inalterada	0,2-0,4
S-7b-3	Inalterada	0,2-0,4

Tabla I.- Relación de las muestras estudiadas.  
Table I.- List of the studied samples.

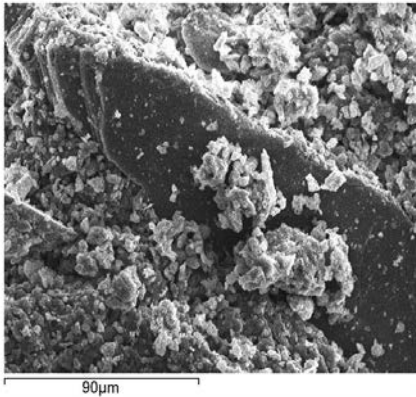


Fig 2.- Microfotografía (MEB) que muestra cristales de yeso insertos en una matriz fina con sales y arcillas.

Fig 2. - Microphotography (SEM) showing gypsum crystals embedded in a fine matrix with salts and clays.

han identificado, además, un pequeño porcentaje de arcillas fibrosas (palygorskita y sepiolita). Mediante las observaciones del MEB, se reconocen arcillas de carácter esmectíticas y cristales de yeso en negro (Fig. 2) de tamaño limo englobados por una matriz fina de arcillas y evaporitas, con una microestructura muy desorganizada.

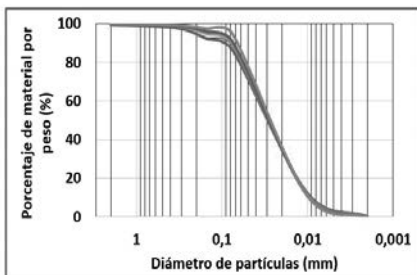


Fig 3.- Distribución granulométrica.

Fig 3.- Granulometric distribution.

Estos materiales presentan una plasticidad variada desde muy baja a intermedia. En cuanto al tamaño de las partículas, están formados por limos (>70%) con fracción de arcilla entre 17 y 20% (Fig. 3).

Según el Sistema Unificado de Clasificación de suelos (USCS) corresponden a un material tipo MI. La actividad (Ac), índice de plasticidad sobre el porcentaje de arcilla, presentó valores entre 1,13 y 3,3. Lo cual representa una actividad alta a muy alta (Seed *et al.*, 1962), indicando minerales hidroquímicamente activos (Tsige, 1999). Las muestras tienen un contenido de materia orgánica del 11% de media. En la tabla II puede verse un

Parámetro	Valor min.	Valor max.
w natural	25%	35%
w higroscópica	5%	8%
$\rho$ (h)	1,7 g/cm <sup>3</sup>	1,8 g/cm <sup>3</sup>
$\rho$ (seca)	1,3 g/cm <sup>3</sup>	1,5 g/cm <sup>3</sup>
e	0,6	0,9
LL	33%	58%
IP	23%	46%
Act. arcilla	1,13	3,33

Tabla II.- Resumen de las propiedades físicas.

Table II.- Summary of the physical properties.

resumen del conjunto de propiedades estudiadas.

Comportamiento mecánico

En general, las muestras para las distintas humedades tienen una relación esfuerzo/deformación similar (Fig. 4), donde experimentan un tramo elástico a bajos desplazamientos (<1%). Posteriormente todas ellas tienen deformación plástica, con una tendencia a la rigidez por deformación (que posiblemente se deba al aumento del empaquetamiento de éstos a lo largo de los procesos de corte), lo que dificulta encontrar puntos de rotura claros. Tomando como referencia el límite de elasticidad (desplaza-

Ensayo CD	C' (kPa)	$\phi'$
w natural	0/0	30°/49°
w natural	5/33	28°/42°
w natural	4/35	24°/35°
w (LP)	11/5	27°/43°
w (LL)	7/13	18°/34°

Tabla III.- Valores de cohesión y fricción de los ensayos de corte directo (elástico/máximo).

Table III.- Cohesive and friction values of direct shear tests (elastic / maximum).

miento <1%) y los puntos de máxima curvatura, se obtienen valores de ángulo de rozamiento interno y cohesión efectivos distintos (Tabla III). Los valores resistentes obtenidos son inferiores en el caso del tramo elástico a los valores tomados en la máxima curvatura. El método de realizar los ensayos de corte directo aplicando las diferentes humedades mencionadas fue un intento de observar la variación de los parámetros resistentes; ángulo de rozamiento interno ( $\phi'$ ) y cohesión (C') con la variación del estado de consistencia de estos materiales (Voight, 1973). Se ha podido comprobar una disminución de ellos con el aumento de la humedad, aunque muy tenue. En todo caso, estos valores de resistencia resultan muy altos para la granulometría

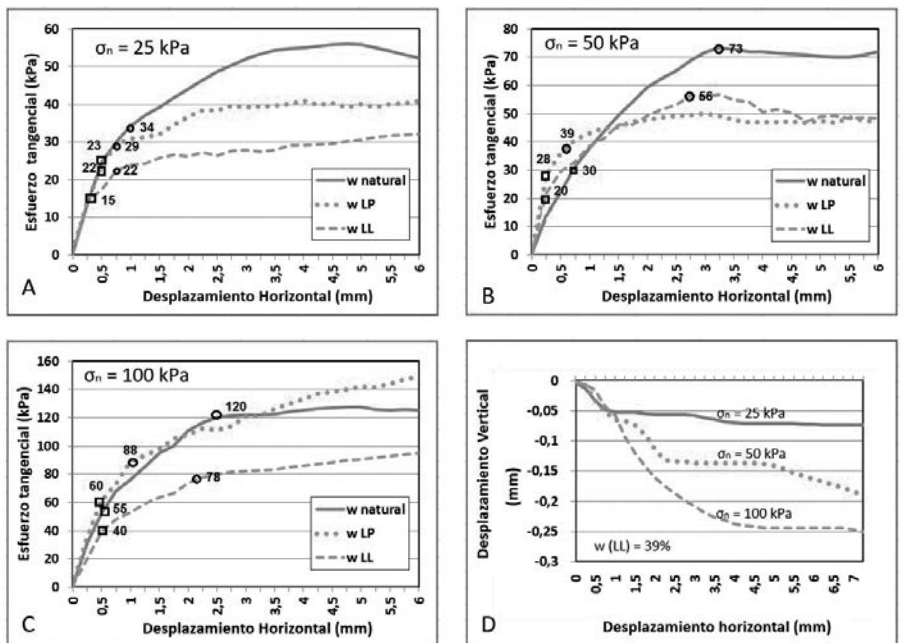


Fig 4.- Relación esfuerzo/desplazamiento para las distintas humedades y con distintos esfuerzos normales (A, B y C). Los cuadrados (□) indican el límite elástico y los círculos (○) los puntos de máxima curvatura. D) Relación desplazamiento vertical/horizontal de una de las muestras. Ver figura en color en la web.

Fig 4.- Stress / displacement ratio for the different humidities and with different normal strength (A, B y C). The quadrates (□) indicate the elastic limit and the circles (○) the points of maximum curvature. D) Vertical / horizontal displacement ratio from one of the samples. See color figure in the web.

de estos suelos. Con respecto a la relación del desplazamiento horizontal y vertical, en toda ella se observa un carácter claramente contractivo, en donde la mayor dilatación negativa se ha registrado para las muestras con carga normal de 100 kPa (Fig. 4D). Los valores del ángulo de rozamiento y cohesión efectiva altos, obtenidos en estos materiales, en referencia a otros limos de carácter siliciclástico (John *et al.*, 1995), pueden ser atribuidos a la composición mayoritariamente yesífera que incrementa la fricción entre las partículas. Por otra parte, la existencia de diferentes sales hidratadas junto a los limos yesíferos, puede haber contribuido a la variación de la humedad relativa y de la succión durante la realización del ensayo (Marinho, 1994; Romero, 1999).

## Conclusiones

La abundancia de yeso y otras evaporitas (minerales higroscópicos) puede estar influyendo en los altos parámetros resistentes obtenidos debido a la variación de la humedad relativa y de la succión. Los parámetros efectivos obligarían a que los agentes habituales (viento, corrientes, hielo) aplicaran una fuerza tangencial muy elevada, por lo que éstos no satisfacen las condiciones de esfuerzos necesarios para que

se produzca el desplazamiento. Esto implicaría la existencia de otros factores que reduzcan o anulen la resistencia friccional entre los bloques y el terreno; existencia de tapices microbianos y/o generación de presiones de poros elevados.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto de investigación CGL2015-66455-R (MINECO-FEDER). Se le agradece a Juan Miguel Insua Arévalo y José Nespereira Jato por sus recomendaciones en este manuscrito.

## Referencias

- Arandilla Mena, P., Corral Marhuenda, A., Ferrero Picado, D. y Martín Herrero, D. (1976). *Mapa Geológico de España E. 1:50000, hoja nº 659 (Lillo) y memoria*. IGME. 17 p.
- Cabestrero, Ó. y Sanz Montero, M.E. (2018). *Journal of Paleolimnology* 59 (2), 139-157.
- Del Buey, P., Cabestreo, Ó., Arroyo, X. y Sanz Montero, M.E. (2018). *Applied Clay Science* 160, 9-21.
- John, B., Reid, Jr., Bucklin, E.P., Copenagle, L., Kidder, J., Pack, S.M., Polissar, P.J. y Williams, M.L. (1995). *Geology* 23, 819-822.
- Marinho, F.A.M. (1994). En: *Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundação*, 515-5227.

- McAllister, J.F. y Agnew, A.F. (1948). *Geological Society America Bulletin* 59, 1377.
- Norris, R.D., Norris, J.M., Lorenz, R.D., Ray, J. y Jackson, B. (2014). *Plos One* 9 (8), 1-11.
- Rodríguez Aranda, J.P. y Sanz Montero, M.E. (2016). *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* 24 (2), 131-142.
- Romero, E. (1999). *Characterization and thermo-hydromechanical behaviour of unsaturated boom clay: an experimental study*. PhD Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain.
- Sanz Montero, M.E. y Rodríguez Aranda, J.P. (2013). *Sedimentary Geology* 298, 53-64.
- Sanz Montero, M.E., Cabestrero, Ó. y Rodríguez Aranda, J.P. (2015). *Earth Surface Processes and Landforms* 40 (7), 864-875.
- Sanz Montero, M.E., Rodríguez Aranda, J.P. y Cabestrero, Ó. (2016). *Geotemas* 16 (1), 177-180.
- Sanz Montero, M.E., Cabestrero, Ó. y Rodríguez Aranda J.P. (2016). *Aeolian Research* 20, 196-197.
- Seed, H.B., Woodward, R.J. y Lundgren, R. (1962). *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division* 88, 53-87.
- Tsige, M. (1999). *Microfábrica y mineralogía de las arcillas azules del Guadalquivir: influencia en su comportamiento geotécnico*. Tesis Doctoral, Univ. Complut. de Madrid, 249 p.
- Voight, B. (1973). *Géotechnique* 23 (2), 265-267.