

Utilización de lodos de corte y pulido del mármol en la recuperación de escombreras de mármol

Making use of mud from marble cutting and polishing to recuperate rubble marble

J. A. Sánchez¹, I. García¹, F. del Moral¹, S. de Haro¹, V. González¹,
M. Simón¹, F. Martín² & A. Iriarte³

RESUMEN

En la regeneración de las escombreras de las explotaciones de Mármol de Macael (Almería), las elevadas pendientes (> 60%) y el marcado contraste textural entre los fragmentos de estériles (Φ medio \approx 2 cm) y el suelo aportado en superficie (Φ medio \approx 30 μ m), condiciona que los gruesos poros de los estériles carezcan de capacidad de succión, lo que hace que se comporten como impermeables, y en el suelo adicional se origina un *flujo en embudo* que, cuando aflora en superficie, erosiona y rompe la manta orgánica de protección. Para evitar dicha erosión, los gruesos poros de la escombrera se rellenaron con lodo de corte y pulido del mármol. El nuevo sistema incrementó la succión y el agua retenida por unidad de superficie, y disminuyó el déficit hídrico de la vegetación implantada y el *flujo en embudo* y, por tanto, los procesos de erosión.

Palabras-clave: Flujo en embudo, infiltración, lodo, regeneración de escombreras de

mármol, retención de humedad.

ABSTRACT

In the regeneration of the rubble marble quarrying in the region of Macael (Almería), the steep slopes (>60%) and marked textural contrast between the pores of the sterile fragments (average $\Phi \approx$ 2 cm) and those of the superficial soil (average $\Phi \approx$ 30 μ m), determine that the extremely large pores of the sterile materials lack suction capacity and are therefore impermeable. As a result, in the superficial soil *funnel flow* occurs, causing erosion when it comes to the surface, and breaking the organic protection. To avoid this phenomenon, the large pores of the slag heap are filled with the sludge arising from marble cutting and polishing. This new system increased suction capacity and water retention by surface unit, and diminished the hydric deficit of the vegetation and the *funnel flow* effect, thus reducing the erosion process.

¹ Dpto. de Edafología y Química Agrícola. Universidad de Almería. Carretera Sacramento s/n, 04120. Almería. España. e-mail: jasanche@ual.es; ² Dpto. de Edafología y Química Agrícola, Universidad de Granada. España; ³ Estación Experimental del Zaidín (Granada). Consejo Superior Investigaciones Científicas. España.

Key-words: Funnel flow, infiltration, mud, marble rubble regeneration, water retention.

INTRODUCCIÓN

Los criterios de restauración ecológica en las zonas degradadas por actividades mineras implican la utilización de sus propios residuos (Jordán *et al.*, 1998; Tedesco *et al.*, 1999; Ram *et al.*, 2006; Sánchez *et al.*, 2007; Jordán *et al.*, 2008), especialmente después del desarrollo de la legislación destinada a mejorar y conservar el medio ambiente (Philip *et al.*, 2000). Los residuos mineros no tienen las condiciones de fertilidad que garantice el éxito de cualquier restauración ecológica, y es necesaria la incorporación de enmiendas orgánicas para obtener un sustrato que presente propiedades físicas, químicas y físico-químicas adecuadas para el desarrollo vegetal (Diosdado *et al.*, 2007; Sánchez *et al.*, 2007; Jordán *et al.*, 2008.)

Los residuos de la explotación del mármol en la Comarca de Macael tienen un tamaño relativamente grande y dejan entre ellos poros muy gruesos que no son capaces de retener humedad, por lo que es imposible que sobre ellos prospere cualquier tipo de regeneración vegetal. Esto ha hecho que, en las restauraciones que están llevando a cabo el Centro Tecnológico Andaluz de la Piedra (CTAP), se ordenen en primer lugar los grandes fragmentos rocosos construyendo un muro basal y, a continuación, se cubran dichos fragmentos de unos 20 cm de tierra vegetal (suelo) procedente de las labores de desmonte previas a la extracción del mármol. Asimismo, para el control de la erosión, se han utilizado mantas (esparto) y redes (coco) orgánicas (Diosdado *et al.*, 2007; Sánchez *et al.*, 2007).

Estos taludes se caracterizan por presen-

tar, además de una pendiente muy acusada (superan el 60 % de inclinación), un marcado contraste textural entre los gruesos fragmentos de los estériles y el suelo que se aporta en superficie. Los primeros dejan entre ellos grandes poros muy superiores a 2 cm de diámetro y, los segundos, tienen una porosidad mucho más fina, con diámetros que pueden oscilar desde milimétricos hasta escasas micras (Figura 1).

Los poros extremadamente gruesos que quedan entre los fragmentos de estériles carecen de capacidad de succión, lo que hace que este material se comporte como impermeable (Miller & Gardner, 1962). En estas condiciones, el agua que se infiltra a través de los 20 cm de suelo depositado sobre los estériles tiende a acumularse en su parte inferior y a circular a favor de la pendiente. Dado que la anchura del flujo que circula en la base del suelo tiende a incrementarse conforme se desciende en la pendiente, se suele llamar *flujo en embudo* (Kung, 1990a, 1990b) y, cuando aflorara en la superficie del suelo, origina un proceso de erosión que puede llegar a romper la manta orgánica de protección (Figura 1).

Por tanto, las partes altas de las laderas serían relativamente secas, el agua retenida se incrementaría progresivamente a lo largo de la ladera (aunque siempre sería escasa debido al pequeño espesor del suelo aportado), hasta que el flujo en embudo saliese a la superficie iniciando la erosión del suelo (zona de difícil implantación de la vegetación). Ladera abajo, la erosión del suelo se incrementaría hasta llegar a romper la manta orgánica de protección. Por último, el suelo erosionado y el agua tenderían a acumularse en la base de la ladera, donde mejorarían las condiciones del crecimiento vegetal. En la Figura 2 se puede ver el resultado de estos procesos en las laderas de la Solana restauradas en 2004.

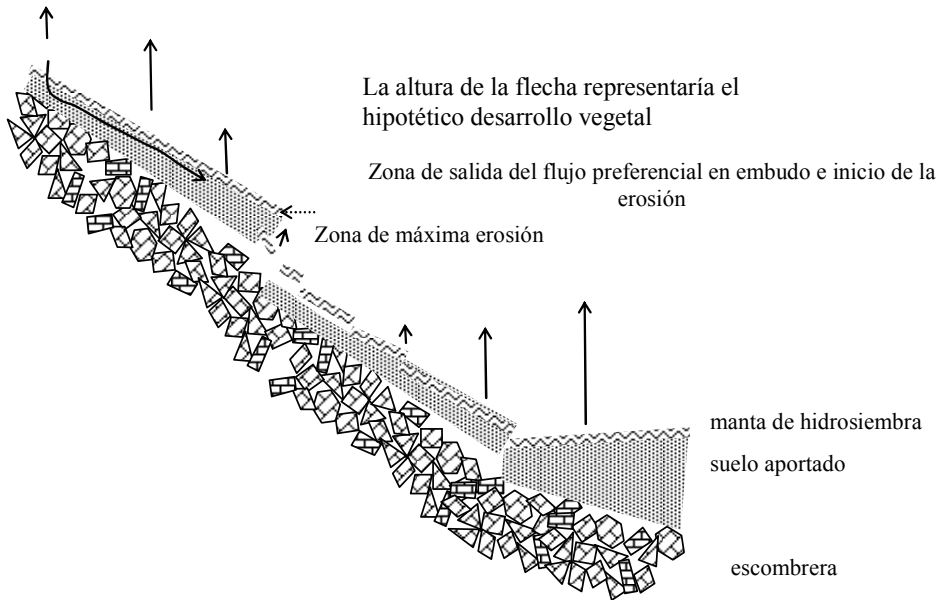


Figura 1. Representación esquemática de las laderas y del comportamiento del agua.

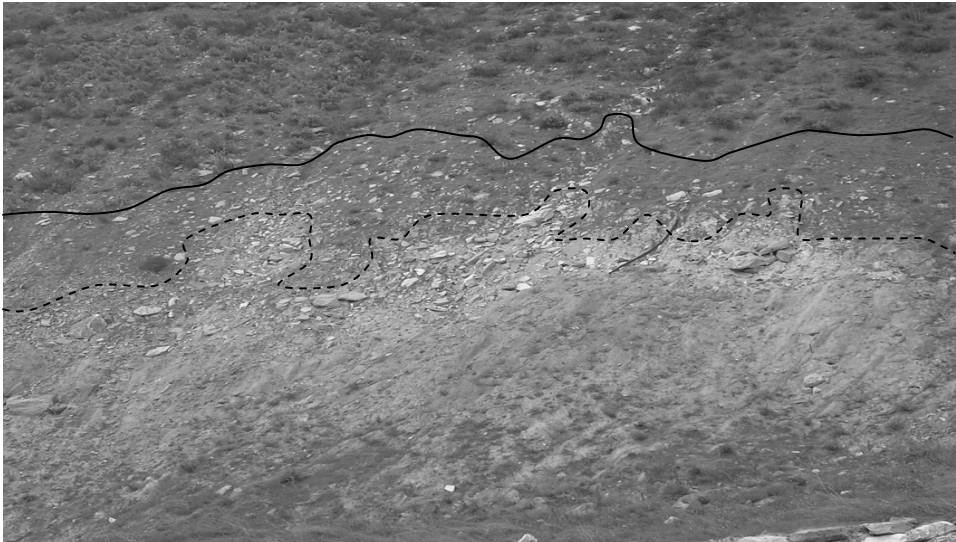


Figura 2. Zona de salida del flujo en embudo (línea continua), máxima erosión del suelo y ruptura de la manta orgánica (línea discontinua).

Por otra parte, en el proceso de corte y pulido del mármol se genera un lodo fino que se vierte de forma incontrolada y oca-

siona importantes problemas ambientales. En la actualidad, la mayor parte de la producción se almacena en balsas, pero el

elevado volumen que está alcanzando hace prever que, en un futuro más o menos cercano, llegue a representar un grave problema ambiental. En este sentido, el objetivo fundamental de este trabajo es estudiar el comportamiento de estos lodos en la regeneración ambiental y, de este modo, poder transformar un residuo potencialmente contaminante en un recurso.

MATERIAL Y MÉTODOS

En junio de 2007, el CTAP acondicionó, en la Comarca del Mármol de Macael (Almería, España), los bloques de una parcela de aproximadamente 1000 m² de superficie y 72% de pendiente. En esta parcela se colocaron 23 barras de acero de diámetro equivalente al de los tubos de acceso de sondas de humedad PR1 (Delta-T Profile Probe). Esta parcela se dividió en dos zonas, la central en la que no se adicionó lodos de corte y pulido, y los laterales en los que los poros de la escombrera se rellenaron con dichos lodos hasta una profundidad aproximada de 20-25 cm. En julio de 2007 la escombrera se cubrió con unos 20 cm de tierra vegetal. A finales de julio se extrajeron las barras de acero y se introdujeron los 23 tubos de acceso de 50 y 100 cm de longitud. A primeros de septiembre procedimos a realizar las primeras medidas de humedad en los 23 tubos de acceso que se repitieron de forma periódica.

La textura del lodo se determinó por el método de la pipeta previa eliminación de materia orgánica con H₂O₂ y dispersión con hexametáfosfato sódico (Lovelland & Whalley, 1991); el pH se midió en una suspensión lodo:agua de 1:2,5; el contenido en carbonato cálcico equivalente se estimó por el método de Barahona (1984); la materia orgánica según Tyurin (1951); la densidad aparente según Santos (1979); el agua útil se

calculó a partir del agua retenida a 33 y 1500 kPa; la conductividad eléctrica se estimó a partir del extracto de saturación siguiendo el método de Bower & Wilcox (1965); los elementos minoritarios se midieron por ICP-MS en un equipo Hewlett Packard, 4500 series, previa digestión ácida de la muestra con HNO₃+HF, mientras que el contenido total de elementos mayoritarios se determinó por Fluorescencia de RX con el equipo Bruker S4 Pioneer.

La caracterización hídrica de las laderas (infiltración, escorrentía superficial y erosión) y la comprobación del *flujo en embudo* en el contacto entre el suelo aportado y los materiales gruesos de la escombrera, se llevó a cabo utilizando un simulador de lluvia de intensidad variable, con una superficie de experimentación de 0,25 m² (Simón *et al.*, 1998) en cuyo centro se colocó una sonda de humedad PR1 (Delta T- Profile Probe) para evaluar las variaciones de humedad en profundidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las experiencias con el simulador de lluvia pusieron de relieve que la tasa de infiltración decreció en función del tiempo de experimentación y, por tanto, del grado de humedad del suelo, hasta alcanzar un valor constante conocido como *tasa de infiltración final* (If). Por otra parte, If no tuvo un valor constante, ya que se incrementó significativa ($p < 0,001$) y linealmente en función de la intensidad de lluvia (I) (Figura 3).

La tasa de escorrentía (Es), se incrementó significativa ($p < 0,001$) y linealmente con la intensidad de lluvia (I) de acuerdo con la ecuación:

$$Es \text{ (mm h}^{-1}\text{)} = -11,42 + 0,523 I \text{ (mm h}^{-1}\text{)} \quad r^2 = 0,998 \quad (1)$$

A partir de la Eq (1) se estimó la intensidad de lluvia crítica (I_c) a partir de la cual se inició la erosión, que fue de $21,8 \text{ mm h}^{-1}$.

Las tasas de erosión (E_r) se incrementó significativa ($p < 0,001$) y linealmente con la intensidad de lluvia a través de la ecuación:

$$E_r (\text{Mg ha}^{-1} \text{ h}^{-1}) = 0,0095 I (\text{mm h}^{-1}) - 0,2502 \quad r^2 = 0,995 \quad (2)$$

La Eq (2) indica que la erosión se inicia a una intensidad de lluvia relativamente elevada (para $E_r = 0$, $I = 26,3 \text{ mm h}^{-1}$) y que,

incluso con altas intensidades de lluvia ($I = 50 \text{ mm h}^{-1}$), la erosión es relativamente baja ($0,225 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$)

Del mismo modo, se comprobó que el *flujo en embudo* se iniciaba en el contacto entre los materiales gruesos de la escombrera y el suelo aportado, que es donde tiende a acumularse el agua que se infiltra en el suelo (Figura 4).

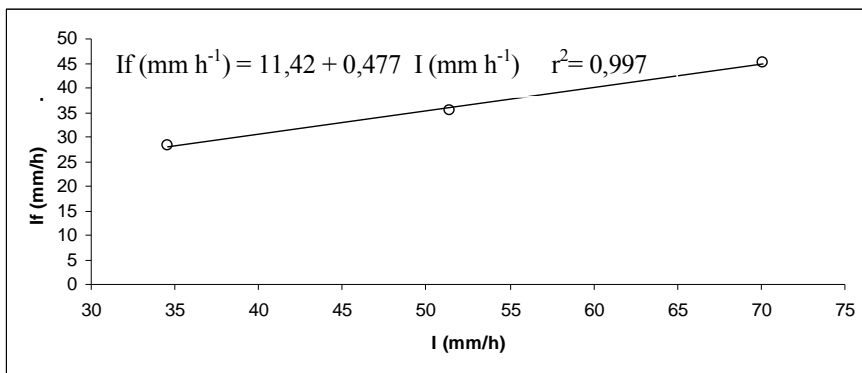


Figura 3. Tasas de infiltración final (I_f) de la escombrera en función de la intensidad de lluvia (I).

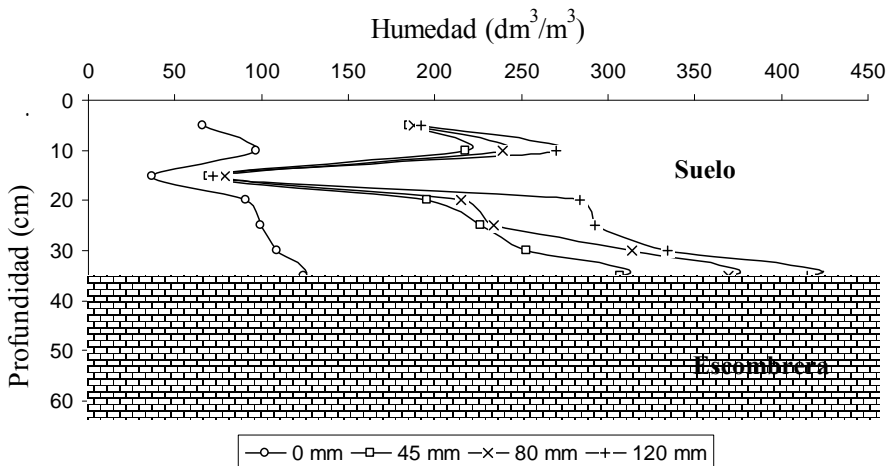


Figura 4. Acumulación de agua en la interfase suelo – escombrera en la parcela de experimentación en función de la cantidad de lluvia adicionada.

Tabla 1. Datos analíticos de los lodos de corte y pulido

CARACTERIZACIÓN FÍSICO - QUÍMICA	Tamaño de partícula (μm)	> 2000	3,6
		2 - 50	64,2
		< 2	32,2
	Densidad aparente (Kg m^{-3})		1,47
	Materia orgánica (%)		0,10
	CaCO_3 eq (%)		99
	Agua útil ($\text{dm}^3 \text{m}^{-3}$)		332
ELEMENTOS MAYORITARIOS (g kg^{-1})	Conductividad eléctrica extracto saturación (dS m^{-1})		2,03
	pH		9,1
	Ca		386,9
	Mg		7,5
	Si		4,3
	Al		1,9
ELEMENTOS MINORITARIOS (mg kg^{-1})	Fe		1,1
	As		3,76
	Hg		4,44
	Cd		0,19
	Pb		1,18
	Zn		7,05
	Cu		1,67
	Ni		7,80

En el proceso de corte y pulido del mármol se genera un lodo fino con textura franco arcillosa, constituido casi exclusivamente por carbonatos, pH alcalino, bajo contenido en sales solubles, alta capacidad de retención de agua útil para las plantas y concentraciones en metales pesados inferiores a las de los suelos naturales (Tabla 1). Todas estas características lo convierten en un material apto para rellenar los poros gruesos de la escombrera, aumentar su capacidad de succión de agua y hacer que el flujo en embudo no alcance la superficie de la ladera; al tiempo que incrementaría el agua retenida en la ladera y reduciría el déficit hídrico de la vegetación implantada.

Las variaciones del contenido en humedad en la escombrera están claramente diferenciadas entre los sectores con lodo y sin lodos. Los datos obtenidos en el sector

donde no se adicionaron lodos sólo detectó humedad en los primeros 20 cm, y la acumulación de humedad en profundidad está condicionada por la existencia o no de intercalaciones de materiales más finos de desmontes entre los grandes fragmentos rocosos (Figura 5).

En el sector donde se adicionaron lodos se detectó humedad hasta los 50 cm (Figura 6) en unos casos y hasta 80 en otros, reteniendo mayores cantidades de humedad y aumentando considerablemente el agua disponible en relación con el sector sin lodos (Figura 5); lo que dio lugar a una reducción el periodo de déficit hídrico y favoreció el desarrollo de la vegetación implantada. En este caso, el flujo en embudo se inició a la profundidad de 40-45 cm (Figura 6), de forma que, antes de salir a la superficie, la carga hidráulica de esos pri-

meros 40-45 cm haría que el agua se infiltrase en el interior de la escombrera (infil-

tración en dedos), lo que limitaría el proceso de erosión superficial.

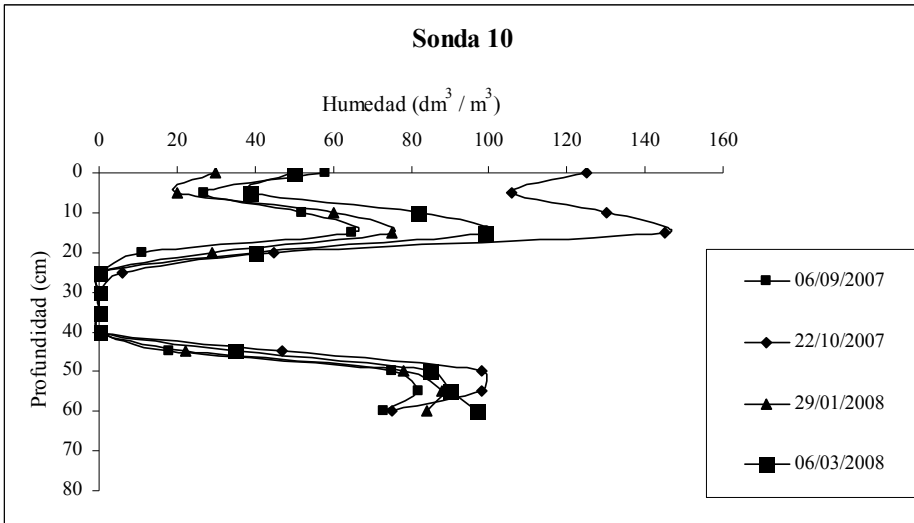


Figura 5. Evolución en el tiempo y en profundidad de la humedad en el sector sin lodo.

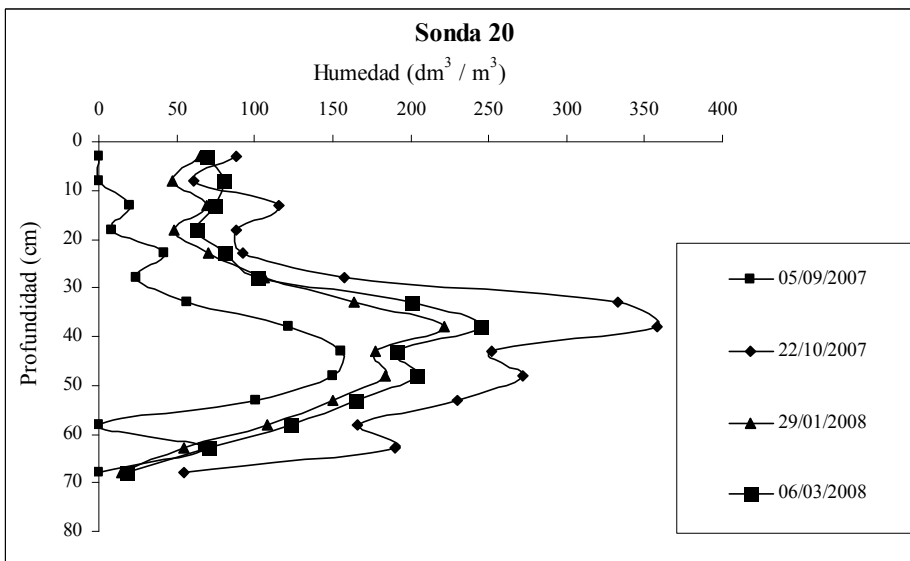


Figura 6. Evolución en el tiempo y en profundidad de la humedad en el sector con lodo

CONCLUSIONES

La adición de lodo a las escombreras antes de la incorporación de los 20 cm de tierra vegetal mejora la retención de agua por parte de las laderas, al tiempo que incrementa la succión del agua que se infiltra en la escombrera.

El flujo en embudo se inicia a mayor profundidad (\approx 40-45 cm), de forma que, antes de salir a la superficie, la carga hidráulica infiltra el agua en el interior de la escombrera (*flujo en dedos*), lo que presumiblemente frenaría el proceso de erosión superficial.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha financiado por el contrato de investigación F08/2006, llevado a cabo entre el CTAP y la Universidad de Almería y el Proyecto de Excelencia de la Junta de Andalucía "Reutilización de lodos residuales en la industria del mármol" (RNM 033003).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barahona, E. 1984. Determinación de carbonatos totales y caliza activa (Grupo de trabajo de normalización de métodos analíticos). I Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo, Vol I. pp. 53-67. Madrid.
- Bower, C.A & Wilcox, L.V. 1965. Methods of soils analysis. Am. Soc. Of Agron. Part 2: pp. 935-940.
- Diosdado, J.C., Bendala, C., Cruz, F.J., Martínez, F.J. & Pozo, E. 2007. Restauración de la cubierta vegetal en los taludes de estériles de la Comarca del Mármol de Macael (Almería). Libro de actas del 1º Congreso Internacional "Retos ambientales en el sector de la Piedra Natural", pp 279-288. Cáceres (España).
- Jordán, M.M., Mateu, J. & Boix, A. 1998. A classification of sediment types based on statistical multivariate techniques. Water Air Soil Pollut., 107:91-104.
- Jordán, M.M., Pina, S., García-Orenes, F., Almendro-Candel, M.B. & García-Sánchez, E. 2008. Environmental risk evaluation of the use of mine spoils and treated sewage sludge in the ecological restoration of limestone quarries. Environ Geol, 55:453-462.
- Kung, K., 1990a. Preferential flow in a sandy vadose zone 1. Field observation. Geoderma, 46: 51-58.
- Kung, K., 1990b. Preferential flow in a sandy vadose zone 2. Field observation. Geoderma, 46: 59-71.
- Loveland, P.J. & Whalley, W.R. 1991. Particle size analysis. In Smith KA, Mullis CE, editors. Soil analysis: Physical Methods. pp. 271-328. Marcel Dekker, New York.
- Marañés, A., Sánchez, J.A., de Haro, S., Sánchez, S.T. & del Moral, F. 1998. Análisis de Suelos. Metodología e Interpretación. Serv. Publ. Univ. Almería. Almería. 183 pp.
- Miller, D.E. & Gardner, W.H., 1962. Water infiltration into layered soil. Soil Sci. Am. Proc., 26: 115-119.
- Philip, C., Rod, W. & Bell, J. 2000. Spider communities as tools in monitoring reclaimed limestone quarry Landforms. Landscape Ecology, 15: 401-406,
- Ram, L.C., Srivasta, N.K., Tripathi, R.C., Jha, S.K., Sinha, A.K., Singh, G. & Manoharan, V. 2006. Management of mine spoils for crop productivity with lignite fly ash and biological amendments. J Environ Manag, 79(2):173-187.
- Sánchez, J.A., García, I., del Moral, F., de Haro, S. & Simón, M. 2007. Propiedades hídricas de los taludes de estériles de la industria del mármol de Macael (Almería). Libro de actas del 1º Congreso Inter-

- nacional "Retos ambientales en el sector de la Piedra Natural", pp 303-308. Cáceres (España).
- Santos, F. 1979. Estudio geológico y edafológico del sector Montiel - Alcaraz - Bienservida. Tesis Doctoral. Universidad de Granada.
- Simón, M., Iriarte, A., Guardiola, J.L., Barahona, E. & García, I. 1998. Soil-Infiltration rate under different vegetation cover using a rain simulator of variable intensity. In Rodríguez Rodríguez, A., Jiménez Mendoza, C.C. & Tejedor Salguero M.L., eds. The soil as strategic resource: degradation processes and conservation measures, pp 177-188. Geofoma Ediciones. Logroño.
- Tedesco, M.J., Teixeira, E.C., Medina, C. & Bugin, A. 1999. Reclamation of spoil and refuse material produced by coal mining using bottom ash and lime. *Environ Technol*, 20(5):523-529.
- Tyurin, I.V. 1951. Analytical procedure for a comparative study of soil humus. *Trudy Pochr. Inst. Dokuchaev*.