

MONITORIZACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA EN LOS SUSTRATOS DE RESTAURACIÓN MINERA: CALIBRACIÓN DE LAS MEDIDAS DE TDR EN LABORATORIO Y CAMPO

C. Rubio^{1,3}, C. González-Flor², R. Josa²

¹ Dep. Geociencias Ambientales, Instituto de Ciencias de la Tierra Jaume Almera (CSIC), Lluís Solé i Sabarís s/n, 08028 Barcelona, crubio@ija.csic.es

² Dep. Ingeniería Agroalimentaria y Biotecnología, Edificio D, Escuela Superior de Agricultura (UPC), Canal Olímpic s/n, 08860 Castelldefels (Barcelona), ramon.josa@upc.edu

³ Centro Asesoría Dr. Ferrer S.L., Ferran Catòlic 3, 25200 Cervera (Lleida)

RESUMEN. Los riegos de soporte se están incorporando de forma creciente en los planes de restauración de canteras de la zona mediterránea. Este aporte pretende responder a la demanda hídrica estival de la vegetación introducida durante la fase inicial de siembra. La restauración se hace en sustratos preparados con mezclas de rechazos minerales de la propia cantera y de materia orgánica residual. Son sustratos heterométricos. La morfología del área restaurada está caracterizada por la fuerte pendiente de los taludes que reducen la eficacia de la infiltración a favor de la escorrentía superficial, de lo que resulta una baja uniformidad de la distribución del agua aportada.

La utilización de sondas TDR fijas, en puntos representativos de las parcelas puede ser una herramienta útil para la toma de decisiones relativas al momento, frecuencia y dosis de riego a aplicar. En este estudio, se presentan los resultados de una experiencia de monitoreo del contenido de agua en un sustrato de restauración de piedra caliza (macizo del Garraf-Ordal al S de Barcelona). Se trata de un sustrato de una granulometría favorable a la utilización de la técnica de TDR, a pesar de contener abundantes gravas. El periodo de monitoreo corresponde al de mayor déficit hídrico, por tanto las medidas se realizaron en las condiciones desfavorables para el uso del TDR (bajo rango de humedad).

Los resultados de campo se basan en la experiencia de laboratorio, donde se utilizó un conjunto de muestras sintéticas preparadas con la mezcla de gravas y arena de la misma localidad. En general, éstos muestran una buena respuesta del TDR a las variaciones de humedad aplicando la ecuación de Topp et al. (1980). Los resultados de laboratorio muestran una buena respuesta del método al gradiente creciente de la cantidad de gravas presentes en el sustrato.

ABSTRACT. Support irrigation is being increasingly incorporated into quarry restoration plans in the Mediterranean area, to satisfy water demand of vegetation introduced during summer periods. The substrate used in restoration is usually prepared by mixing mineral debris from the quarry with residual organic matter, resulting in a highly heterometric matrix. The high slopes in the restored area reduce water infiltration and enhance surface runoff, causing an

uneven spatial distribution of soil moisture.

Using TDR probes placed in representative locations of the experimental revegetation plots can help to plan irrigation strategies. We monitored soil water content in a restoration substrate applied in a quarry located in the Garraf-Ordal massif (Southern Barcelona). Particle size distribution was suitable for the application of the TDR method, despite the elevated gravel fraction. Monitoring was carried out during high water deficit conditions and, therefore, measurements were taken under unfavourable conditions for the use of TDR.

Field results have been compared to those obtained in the laboratory with a synthetic samples-set performed with different sand and gravel contents. The results showed that the TDR response was acceptable using the two equations: Topp et al. (1980) and specific calibration for these types of substrates.

1.- Introducción

Las explotaciones de áridos, son un claro ejemplo de espacios degradados, que en su mayoría, coexisten, cercanos a los núcleos de población. La Ley 12/81 sobre actividades extractivas, obliga a las explotaciones mineras a adoptar el compromiso de la restauración del espacio de explotación, con el objetivo de corrección y/o reducción del impacto ambiental que genera la extracción del recurso natural. Actualmente, la Restauración Ecológica, basada en la reintroducción de una vegetación "naturalizada" simultáneamente a la explotación, es una de las prácticas utilizadas. Su éxito depende, entre otros factores, de la calidad del sustrato que se utiliza, siendo el primer paso para la reconstrucción del "medio naturalizado" la reconstrucción física y química del medio edáfico.

La reconstrucción del sustrato de restauración debe ser no contaminante y eficiente para el crecimiento vegetal, es decir, que sea capaz de suministrar el aporte hídrico y los nutrientes necesarios para la vegetación. El objetivo final de la restauración es, obtener un sistema autónomo de auto-regeneración.

Los sustratos utilizados, conllevan el uso de materiales con granulometrías de extenso rango diamétrico y elevada heterogeneidad, haciendo la reconstrucción física compleja, sobretudo, por las limitaciones en el suministro hídrico para la

vegetación introducida. Una solución, para atenuar la limitada capacidad de reserva de agua útil del sustrato es, la aplicación de riegos de soporte durante los períodos de fuerte demanda evapotranspirativa, especialmente durante la fase de implantación, que es más crítica. La utilización de sondas fijas para la medida de la humedad del suelo basándose en el método de la Reflectometría en el Dominio Temporal (TDR) (Smith-Rose, 1933; 1935), se presenta como una herramienta útil para la planificación de los riegos de soporte.

Fellner-Feldegg (1969), mostró como el TDR podía utilizarse para medir la constante dieléctrica en líquidos a través de una onda transmitida por un vector coaxial. Topp et al. (1980), Dalton et al. (1984) y Topp y Davis (1985) demostraron la aplicabilidad de este método en la determinación del contenido hídrico en condiciones de no saturación para muestras de suelo no alteradas. En 1989 Drungil et al., utilizaron la técnica de TDR para la determinación del contenido de agua en suelos ricos en gravas.

El objetivo principal de este trabajo es, evaluar la aplicación de la Reflectometría en el Dominio Temporal (TDR), en la respuesta del contenido hídrico de un medio que si bien es heterométrico en cuanto al tipo de partículas, muestra una distribución espacial isótropa derivada de la presencia de las abundantes gravas.

2.- Material y métodos

Se ha trabajado en condiciones de laboratorio, con muestras sintéticas formadas con mezcla de arena y gravas procedentes de cantera. En condiciones de campo, se dispuso de una serie de parcelas con sensores TDR, realizando un seguimiento durante el periodo de sequía estival.

2.1. Muestras sintéticas, humectación y medida del contenido de agua por el método de referencia

Se han preparado a partir de diferentes proporciones de arena y grava. La arena utilizada se secó al aire y se tamizó entre 2000 μm y 250 μm . La grava se obtuvo de una cantera de áridos del macizo Garraf-Ordal (NE, España), zorra tamizada para los diámetros de 8 y 13 mm.

Se mezclaron proporciones adecuadas de arena y grava para obtener las siguientes proporciones de grava respecto el total de muestra: 0, 1, 2, 10, 27, 46 y 55 % (en peso).

Se definieron 7 niveles de humedad y se determinó la cantidad necesaria de agua a aportar para obtener contenidos hídricos próximos a los valores que se pretendían ensayar. La humectación, se realizó utilizando agua destilada para no introducir elementos salinos, mezclando un volumen conocido de muestra con la cantidad de agua calculada. Estos niveles de humedad solo se han tenido en cuenta durante el proceso de preparación

de muestras húmedas. El rango de humedad ensayado se extiende desde las muestras secas al aire hasta valores máximos de 50% en algunas muestras.

Cada muestra humectada (incluido el nivel de muestra seca al aire) se colocó en cinco depósitos cuadrados (7.5 X 7.5 X 26 cm) realizándose tres réplicas por contenedor. La densidad aparente de cada muestra se determinó a partir del volumen que ocupó en los contenedores, una vez asentada la muestra. El asentamiento de las muestras se realizó dejando “caer” cuatro veces el contenedor sobre una superficie de madera, y desde una altura de 20 cm, obteniendo un medio moderadamente heterométrico, por el rango de tamaño de partículas que incluye, pero isotrópico, por su distribución aleatoria.

El contenido de agua (θ) se determinó por el método gravimétrico (pérdida de peso a 105°C) y los resultados se transformaron a volumen-volumen⁻¹ utilizando la densidad aparente correspondiente. Este método de determinación de contenido hídrico lo anotamos como *MRef*.

Para estimar la calidad de las muestras sintéticas, se utilizaron los criterios de tolerancia y validez de Shewhart (1939) aplicados a los resultados obtenidos por el *MRef* y para el mismo volumen hídrico por muestra. De esta forma se comprobó el comportamiento consistente y predecible en el conjunto de las muestras.

2.2. Medición del contenido hídrico mediante TDR

Para determinar el contenido hídrico de las muestras se utilizaron sondas de tres varillas, de 20 cm de longitud y 0.3 cm de sección cada una, insertadas en un molde aislante de resina, y separadas entre sí a una distancia fija de 3 cm.

La inserción de las sondas en los contenedores se hizo de forma vertical, alterando lo menos posible la muestra. Esta técnica no presentó una dificultad adicional, atendiendo a las condiciones experimentales de (i) homogeneidad en el tamaño de las gravas (hasta 13 mm), (ii) homogenización previa de la muestra sintética y (iii) la reducida compactación de éstas, que únicamente mostraron un proceso de asentamiento mínimo (cf. 2.1). Se ha estimado que, la inserción de la sonda en la muestra presentó una variación en el volumen total de ésta del 0.4%, mientras que, la variación en el volumen promedio previsible de muestra influenciada por la onda electromagnética fue inferior al 1%.

La medición de la humedad se realizó con un cable téster marca Tektronics® 1502-C.

La relación entre las propiedades dieléctricas de un medio (por ejemplo von Hippel, 1953; Kittel, 1960) y su contenido hídrico fue estimada por Topp et al. (1980) a partir de la siguiente expresión:

$$\theta = -5.3 \cdot 10^{-2} + 2.92 \cdot 10^{-2} \varepsilon_r - 5.5 \cdot 10^{-4} \varepsilon_r^2 + 4.3 \cdot 10^{-6} \varepsilon_r^3 \quad (1)$$

Donde θ es el contenido volumétrico de agua en el suelo ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) y ε_r la permitividad relativa del medio (o constante dieléctrica relativa), definida por:

$$\varepsilon_r = \left(\frac{l_a}{l_r} \right) \tag{2}$$

donde l_a y l_r son la longitud aparente y real de la sonda (m), respectivamente.

Esta relación empírica entre θ y ε , anotada como *MTda*, ha sido altamente utilizada debido a la versatilidad que comporta, mostrándose independiente de variables como la textura, la densidad aparente, la temperatura y/o la salinidad (Dalton y van Genuchten, 1986), que pueden incidir directamente en la capacidad de retención hídrica del suelo.

2.3. Calibración

Utilizando los valores de permitividad eléctrica y los resultados del MRef, se ha establecido una función de calibración específica para el tipo de material utilizado. Esta función la anotamos como *MCal*.

2.4. Incertidumbre

Para el análisis de la incertidumbre del método se utilizaron dos funciones objetivas. El error medio (EM) para cuantificar el sistemático sesgo entre los datos de TDR y MRef, y la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RECM) que determinó la dispersión de los datos. Estas funciones vienen expresadas por:

$$O_{EM} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (\zeta'_i - \zeta_i) \tag{3}$$

y

$$O_{RECM} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (\zeta'_i - \zeta_i)^2} \tag{4}$$

donde, O_{EM} es el error medio y O_{RECM} la raíz cuadrada del error cuadrático medio ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$). Los símbolos ζ y ζ' corresponden a los contenidos hídricos obtenidos a partir MRef y TDR, respectivamente. n es el número de medidas para las cuales se calculó el EM y RECM.

3.- Resultados y Discusión

3.1. Calidad de las muestras sintéticas

Los resultados obtenidos de las muestras sintéticas presentaron un valor medio de densidad aparente de $1968 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (porosidad total media 26%). Las diferencias más relevantes se observan en los contenidos de gravas más elevados, donde los valores de densidad aparente son mayores. En general, los coeficientes de variación se

pueden considerar de bajos o muy bajos, con un rango que oscila entre 2.8% y 0.6%. Debido a la baja superficie específica de la fracción arena, los contenidos en agua higroscópica observados no presentaron variaciones significativas en el conjunto de las muestras.

La determinación de los criterios de tolerancia y validez de calidad de las muestras sintéticas indicaron que, el rango de valores obtenido para el conjunto de las éstas fue entre 19.5 y $10.3 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, para los límites superior e inferior de 29.1 y $3.9 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, respectivamente, y una tendencia central de $16.5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Por tanto se observó que, la preparación de las muestras fue lo suficientemente homogénea, con variaciones mínimas en su contenido hídrico.

3.2. Contenido hídrico

La Tabla 1 muestra los valores medios de los contenidos hídricos de todas las muestras sintéticas (para cada contenido de gravas se incluye todo el rango de humedades utilizado), obtenidos a partir del método de referencia y de las dos ecuaciones (MTda y MCal), y agrupados por el contenido de gravas.

Los resultados de la calibración específica presentaron valores más cercanos a los obtenidos a partir de MRef. MTda, sobreestimó los valores de humedad, incluso en las muestras sin grava.

La baja variabilidad en los contenidos hídricos promedio de las muestras, con contenidos de gravas comprendidos entre el 0% y el 27% (Tabla 1), puede atribuirse a las variaciones existentes en las características del diámetro equivalente del medio poroso de las muestras, para cada porcentaje de gravas estudiado.

Tabla 1. Valores medios de humedad volumétrica, en sustratos con diferentes contenidos de gravas, determinada para el método de referencia (MRef) y utilizando 2 funciones diferentes a partir de la permitividad obtenida por TDR. MTda= función de Topp et al. (1980), MCal= función de calibración específica, \bar{x} = valor promedio, σ = desviación estándar, n = número de muestras

Contenido gravas (%)	n	Método					
		MRef		MTda		MCal	
		\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
0	86	19.1	11.4	20.2	10.2	19.7	12.2
1	104	18.4	14.0	19.7	10.9	18.6	13.1
2	99	18.4	13.1	19.5	10.6	18.6	12.6
10	98	18.1	11.6	18.8	9.9	17.4	10.8
27	101	19.5	13.0	19.3	11.4	18.0	12.7
46	66	11.8	8.1	14.0	7.2	12.4	8.2
55	56	10.3	6.4	13.1	5.7	11.4	6.7

3.3. Validación de los métodos utilizados

La relación de contenido hídrico entre MRef y las observaciones a partir de MTda. (Fig. 1), muestra un aceptable ajuste en todo el rango del contenido de gravas. No obstante, en los niveles más bajos de humedad ($\theta < 10\%$

vol-vol⁻¹) se observa una fuerte discrepancia en los resultados y MTda sobreestima sistemáticamente los resultados. En condiciones experimentales (laboratorio), MTda es de aplicación limitada, lo que sugiere que en las condiciones de campo descritas (por ejemplo, medidas de humedad en suelos pedregosos con elevada macroporosidad y muy secos) el contenido hídrico estará sobreestimado.

Para los niveles de gravas comprendidos entre 0% y 2%, y con contenidos hídricos superiores a un 40% (vol-vol⁻¹), se observó una ligera subestimación en las medidas obtenidas con MTda (Fig. 1).

Con el conjunto de las muestras se realizó el ajuste de los valores MRef constituyendo una curva de calibración (MCal) (González-Flor, 2006), La función de calibración utilizada presentó la siguiente expresión:

$$\theta = -2.810^{-2} + 0.8810^{-2} \varepsilon_r - 5.210^{-4} \varepsilon_r^2 + 11.510^{-6} \varepsilon_r^3 \quad (5)$$

La Fig. 2, muestra como el ajuste entre los datos obtenidos por MRef y los obtenidos con MCal es muy aceptable para todo el rango de contenidos de gravas.

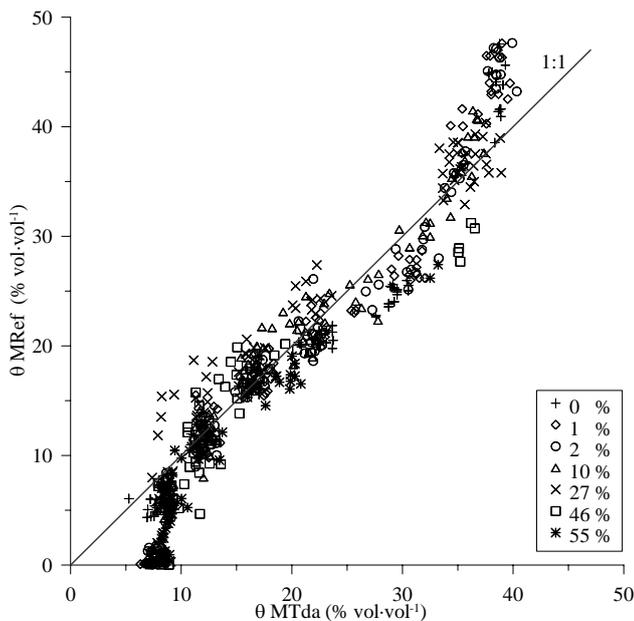


Fig. 1. Valores de contenido hídrico según los diferentes niveles de gravas. Relación entre las humedades obtenidas utilizando MRef y MTda.

Se observó que, las dos ecuaciones, MTda y MCal, presentaron una misma sensibilidad al contenido hídrico de sustratos con gravas cuando la humedad volumétrica está comprendida en un rango entre 15% y 25% (vol-vol⁻¹). Para los contenidos hídricos inferiores a estos valores, la función MTda, presentó sobreestimaciones del orden de 7% vol-vol⁻¹, mientras que en valores superiores a un 40% vol-vol⁻¹, es decir, cuando la muestra está próxima a condiciones de saturación, la misma función subestimó los contenidos hídricos.

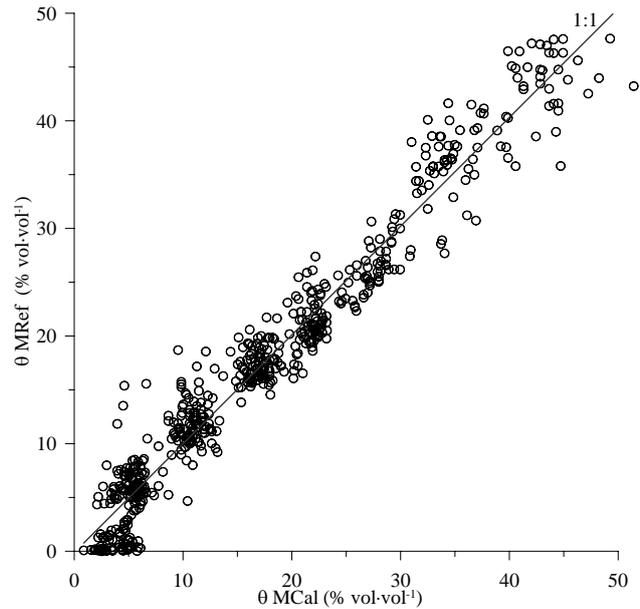


Fig. 2. Relación entre la humedad volumétrica obtenida utilizando MRef y la obtenida a partir de TDR utilizando la calibración específica (MCal) para todas las muestras sintéticas.

Los errores estándar calculados para los contenidos de agua en volumen según Topp et al., (1980) y la calibración específica fueron de 0.41% y 0.48%, respectivamente. Estos valores se mostraron dentro del rango determinado por otros autores (por ejemplo Topp et al., 1980; Dalton y van Genuchten, 1986), donde las calibraciones específicas del método obtuvieron los mejores ajustes.

3.4. Incertidumbre de los métodos

A partir del cálculo del error medio (ME) se determinó la sobre o subestimación de los valores estimados (MTda y MCal) a los observados (MRef), para las muestras sintéticas (Tabla 2).

En general, MTda y MCal presentaron un bajo sesgo para los diferentes grupos muestrales, con un rango promedio entre -0.008 y 0.019 vol-vol⁻¹. Según Rajkai et al. (1996), se puede considerar que la bondad de un ajuste para la predicción es aceptable cuando la estimación del EM no es superior a un 2.5%, así, la bondad de los ajustes de las dos funciones para la estimación de la humedad volumétrica se encuentra dentro del rango de aceptabilidad.

La dispersión de los valores se ha calculado a partir del error cuadrático medio (RECM). Para las dos ecuaciones, los valores medios presentaron un rango entre 2.5% y 4% vol-vol⁻¹. Los valores más sobreestimados se dieron para MTda en los contenidos más elevados de gravas (alrededor 4% vol-vol⁻¹), mientras que MCal mostró un equilibrio en el conjunto de los grupos de muestras (alrededor 2% vol-vol⁻¹), correspondiendo el valor más elevado a 3.9% vol-vol⁻¹ para el 27% de contenido de gravas.

Tabla 2. Error medio (EM) y error cuadrático medio (RECM) de la comparación entre el método de referencia (MRef) y las funciones para la estimación de la humedad volumétrica: función de Topp et al (MTda) y función de calibración específica (MCal).

Contenido Gravas (%)	Métodos			
	MTda		MCal	
	ME	RMSE	ME	RMSE
0%	0.011	0.031	0.004	0.020
1%	0.012	0.037	0.002	0.020
2%	0.011	0.031	0.001	0.017
10%	0.008	0.031	-0.007	0.019
27%	-0.002	0.041	-0.015	0.039
46%	0.022	0.043	0.006	0.032
55%	0.027	0.038	0.010	0.025

La Fig. 3, presenta la evolución del contenido hídrico del sustrato durante un periodo de transición pluviométrica en un ambiente mediterráneo (del 4 de Abril al 27 de Julio de 2005), en una parcela experimental situada en una explotación de áridos del Garraf-Ordal. Se incluyen los datos meteorológicos del periodo para contextualizar los valores obtenidos. La medición de humedad se efectuó con una frecuencia semanal, utilizando el método TDR en sondas de doble ánodo colocadas de forma permanente. Los resultados se expresan como $l \cdot m^{-2}$ hasta la profundidad de 25 cm. A la permitividad obtenida se aplicó la ecuación de Topp et al. (1980). El aporte hídrico (AH) del sustrato se contabilizó a partir de la precipitación, y se le adicionaron los aportes derivados del riego de soporte de la parcela. A partir de las variables meteorológicas medidas en la estación se estimó la evapotranspiración potencial (ETp) según la ecuación de Penman-Monteith FAO (Allen et al., 1998).

Se observa que, en general, la respuesta del método TDR es aceptable tanto para periodos con incrementos hídricos relevantes, como para el periodo de mayor demanda hídrica. En detalle, el sustrato es capaz de mantener un régimen hídrico de almacenaje siempre que los aportes superen los 5 mm, de forma relativamente continuada. Los largos periodos con ausencia de precipitación y un riego de soporte limitado, no consiguieron paliar las pérdidas evapotranspirativas del sustrato. Sin embargo, si que los contenidos hídricos medidos en la parcela mostraron similitud con los obtenidos en laboratorio para este tipo de sustratos, utilizando MTda, y con los aportes hídricos definidos en MRef. En ningún caso la humedad volumétrica fue superior a $30 l \cdot m^{-2} \cdot 25cm^{-1}$ ni inferior a $15 l \cdot m^{-2} \cdot 25cm^{-1}$. Por tanto, el sustrato mantuvo el contenido hídrico suficiente para no alterar la sensibilidad del método debido a la disminución del contenido hídrico.

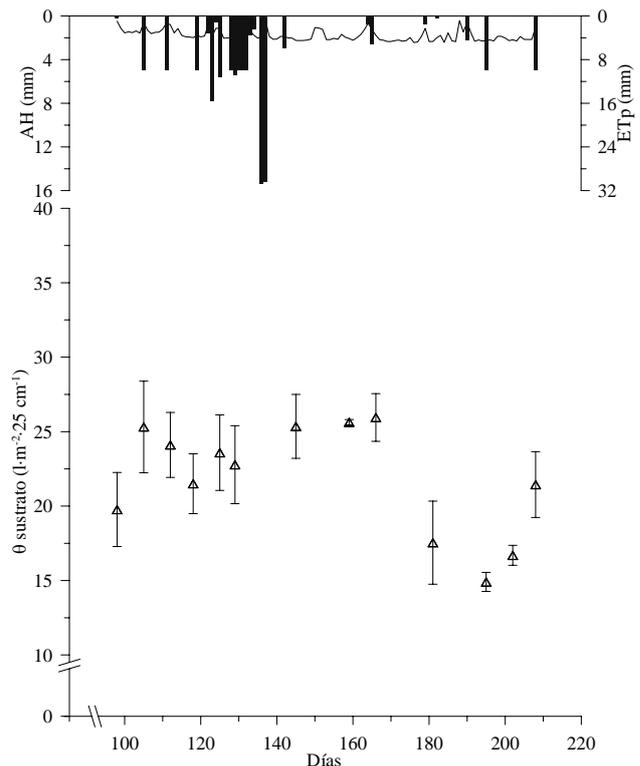


Fig. 3. Aporte hídrico (AH= precipitación+riego), Evapotranspiración potencial (ETp) y humedad volumétrica media observada (n= 4) ± 1 error estándar, en una parcela de extracción de áridos.

4.- Conclusiones

En resumen, se ha observado que los sustratos utilizados para elaborar las muestras sintéticas presentaron la suficiente calidad para ser evaluados en el experimento. Su respuesta al comportamiento hídrico fue similar a la de los sustratos de restauración de la explotación de áridos de la zona Garraf-Ordal.

Se ha demostrado que, la utilización del método de reflectometría en el dominio temporal (TDR) es una útil herramienta para la determinación de los contenidos hídricos en sustratos con elevados porcentajes de gravas.

La aplicación de la permitividad eléctrica a la función de Topp et al (1980), ha presentado resultados muy aceptables, incluso en periodos donde la demanda hídrica por parte del vegetal es elevada y los aportes de agua están disminuidos. Sin embargo, esta metodología es particularmente sensible para un rango de contenidos hídricos comprendido entre 10% y 40% vol-vol⁻¹, mostrando, en este tipo de sustratos, una sobreestimación y subestimación de las humedades volumétricas, fuera de este intervalo. La estimación de una función de calibración específica para estos sustratos mejoró sensiblemente la determinación de las medidas de humedad.

Agradecimientos. Este trabajo se ha realizado dentro del marco del proyecto ECOQUARRY (LIFE04 ENV/ES/000195) financiado por la Comisión de las Comunidades Europeas. Los autores agradecen a los revisores los comentarios aportados.

Bibliografía

- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D. y Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements- In: *FAO Irrigation and drainage paper 56*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma.
- Dalton, F.N.; Herkelrath, W.N.; Rawlins, D.S. y Rhoades, J.D. 1984. Time domain reflectometry: Simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. *Science*, 224, 989-990.
- Dalton, F.N. y van Genuchten, M.Th. 1986. The time-domain reflectometry method for measuring soil water content and salinity. *Geoderma*, 38, 237-250.
- Drungil, C.E.C.; Abt, K. y Gish, T.J. 1989. Soil-moisture determination in gravelly soils with time-domain reflectometry. *Trans. ASAE*, 32, 177-180.
- Fellner-Feldegg, H. 1969. The measurement of dielectrics in the time domain. *J. Phys. Chem.*, 73, 616-623.
- González-Flor, C. 2006. *Efecte del contingut de grava en la mesura d'humitat amb TDR*. TFC, ESAB Universitat Politècnica de Catalunya. 93 p.
- Kittel, C. 1960. *Introduction to soil state physics*, 3rd ed. Wiley, Nueva York.
- Rajkai, K.; Kabos, S.; van Genuchten, M.Th. y Jansson, P.E. 1996. Estimation of water retention characteristics from the bulk density and particle-size distribution of Swedish soils. *Soil Sci.*, 161, 832-845.
- Shewhart, W.A. 1939. *Statistical methods from the viewpoint of quality control*. Graduate School of the Department of Agriculture, Washington D.C.
- Smith-Rose, R.L. 1933. The electrical properties of soil for alternating currents at radio frequencies. *Proc. R. Soc. London*, 140, 359-377.
- Smith-Rose, R.L. 1935. The electrical properties of soil at frequencies up to 100 megacycles per second; with a note on the resistivity of ground in the United Kingdom. *Proc. Phys. Soc. London*, 47, 923-931.
- Topp, G.C.; Davis, J.L. y Annan, A.P. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.*, 16, 579-582.
- Topp, G.C. y Davis, J.L. 1985. Measurement of soil water content using time domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49, 19-24.
- Von Hippel, A. 1953. Dielectrics. In: Candon, E.U.; Odishaw, H. (Ed.), *Handbook of Physics*. McGraw-Hill, New York.