

ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO MEDIANTE EL BALANCE HÍDRICO EXPONENCIAL DIARIO Y COMPARACIÓN CON MEDIDAS *IN SITU* EN UN TYPIC HAPLOXERalf EN LA ZONA CENTRO (MADRID - ESPAÑA)

R. Botey¹, J. Pérez-Arias², J.V. Moreno¹

¹ Área de Climatología y Aplicaciones Operativas, Agencia Estatal de Meteorología, C/Leonardo Prieto Castro, 8. 28040 Madrid, mboteyf@aemet.es , jmorenog@aemet.es

² Departamento de Edafología, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Madrid (U.P.M.). Avd. Complutense s/n 28040 Madrid, juana.perez@upm.es

RESUMEN. El conocimiento de la humedad del suelo puede suponer mejoras en la predicción meteorológica y en el estudio de la variabilidad del clima. Medir el contenido de agua en el suelo es costoso, pero se hace puntualmente necesario para validar las estimaciones que se realicen mediante métodos empíricos. Para estimar diariamente el agua disponible para las plantas (AD) a diferentes niveles de profundidad en un suelo “Typic Haploxeralf” representativo en la zona centro (Madrid-España), se ha utilizado un balance hídrico exponencial diario calculado a partir de datos meteorológicos. La metodología incluye calcular la evapotranspiración de referencia de Penman-Monteith y el balance de agua en el suelo considerando la precipitación como único aporte de agua al suelo. Durante dos años se comparan los datos así estimados, con medidas de contenido volumétrico de agua en el suelo realizadas hasta 0,85m de profundidad, con sensores TDR (Time Domain Reflectometry) TRIME T3 de IMKO y sensores capacitivos ECH₂O (EC-20) de Decagon. El suelo presenta anisotropía en profundidad con un 10% de arcilla en el horizonte superior y un 36% de arcilla en el horizonte argílico. En el tratamiento de los datos procedentes de los sensores de humedad se utiliza una calibración específica para cada horizonte. Los resultados incluyen comprobaciones con diferentes valores de ADT (Agua Disponible Total para las plantas) estimados a partir de datos de caracterización del perfil y de las gráficas de contenido de humedad del suelo obtenidas con los equipos. Las conclusiones muestran que es posible obtener buenos resultados con el balance hídrico exponencial diario sólo cuando se utiliza un valor apropiado de ADT para cada profundidad.

ABSTRACT. The knowledge of soil water content can improve weather forecast and climatic variability studies. The measurement in situ of soil water content is expensive, but it is necessary to validate the results obtained by means of empirical methods. The daily exponential soil water balance calculated from meteorological data has been used in order to estimate plant-available water (AW) at different soil depths of a “Typic Haploxeralf” soil, representative from Central Spain. The methodology includes to calculate the Penman-Monteith reference evapo-transpiration and the soil water balance considering the precipitation as the only water input into the soil. For two years, daily AW data obtained from the water balance were compared with in situ soil volumetric water content measurements down to a

depth of 0,85m, using TDR (Time Domain Reflectometry) TRIME T3 of IMKO and capacitive ECH₂O (EC-20) of DECAGON probes. This type of soil presents vertical textural anisotropy with 10% clay surface horizon and 36% clay argillic horizon. A specific calibration for each diagnostic horizon was used to process data provided by TDR and capacitive probes. The results include checking with different estimated TAW (plant-Total Available Water), and they depend on soil characteristics and the volumetric soil water content plot graphs obtained from data probes. From this study it may be concluded that it is possible to achieve good results using daily exponential water balance but just in cases in which an adequate TAW at each depth is considered.

1.- Introducción

El contenido de Agua Disponible para las plantas (AD) a diferentes profundidades en el perfil del suelo es un factor que determina el desarrollo de la vegetación y por tanto, la supervivencia de los diferentes ecosistemas. La creciente preocupación por las posibles repercusiones del cambio climático pone de manifiesto la necesidad de disponer de valores de los diferentes factores del clima medidos o estimados de una forma homogénea durante un periodo de tiempo suficientemente largo para permitir el estudio de su evolución.

En el territorio español diversas instituciones han llevado a cabo campañas para obtener medidas de humedad de suelo, cabe destacar la red REMEDHUS (Martínez Fernández et al., 2009) en la Cuenca del Duero que dispone de medidas desde 1999. No obstante, no existe una red nacional suficientemente densa.

AEMET (Agencia Estatal de Meteorología) dispone de una red de estaciones meteorológicas completas con series largas (>30 años) de valores diarios de temperatura y humedad del aire, viento e insolación, pero en general no incluyen sensores con los que se obtengan valores diarios de contenido de agua en el suelo. Por tanto, para poder realizar estudios climatológicos medioambientales en los que se requiera disponer con periodicidad diaria de información del contenido de agua en el suelo a diferentes profundidades y durante un periodo de tiempo suficientemente largo (>30 años), es necesario estimar dichos valores mediante un balance hídrico a partir de

valores de las variables meteorológicas medidas, del conocimiento de las propiedades del suelo y del tipo de vegetación.

En este contexto se realizó en Botey et al. (2009) una monitorización de la humedad del suelo hasta 0,30m de profundidad durante un año en emplazamientos muy cercanos a tres observatorios meteorológicos de la provincia de Madrid, sin aportes de agua de riego, y se compararon los resultados con valores obtenidos mediante el cálculo diario del balance hídrico con agotamiento exponencial de la reserva a partir de datos meteorológicos. Existe documentación sobre éste tipo de balance hídrico para valores mensuales según citan Gandullo (2000), MMA (2006) y Almorox (2003), pero para cálculos diarios la documentación existente sobre su comportamiento en cada tipo de suelo es escaso.

La monitorización de la humedad del suelo en los tres emplazamientos se había realizado por el método de extracción de muestra inalterada mediante cilindros de 0,05m de diámetro por 0,05m de altura, lo cual es un método más exacto pero que no permite el muestreo continuo en la misma ubicación ya que se trata de un método destructivo. En el suelo que presentaba anisotropía en profundidad (parcela de Radiosondeo-Barajas) con una mayor acumulación de arcilla en el horizonte argílico, los resultados obtenidos mediante el Balance Hídrico se ajustaban peor a los valores medidos en campo, probablemente por no poder muestrear cada día un perfil de suelo idéntico.

Para evitar este problema en el observatorio de Radiosondeo, se adquirieron dos tipos de equipos de medida de humedad de suelo, el sensor TDR (Time Domain Reflectometry) tipo IMKO T3 y los sensores capacitivos EC-20 de Decagon. En el presente trabajo se pretende comparar para diferentes profundidades y hasta los 0,85m, los valores de contenido de agua en el suelo obtenidos directamente de los sensores previamente instalados y calibrados, con los valores estimados obtenidos mediante el Balance Hídrico Exponencial diario en el Observatorio de Radiosondeo (Barajas Lat 40° 28' 00'', Long 03° 34' 39'' W) sobre un suelo Typic Haploxeralf bien caracterizado previamente. La instalación de los sensores se realizó en octubre de 2008 y la comparación se ha realizado durante dos años desde enero de 2009. Se calculan contenidos volumétricos de agua en el suelo y contenidos de agua disponible para las plantas (AD).

2.- Material y métodos

2.1.- Material

2.1.1.- Suelo

En la ubicación en la que se instalan los sensores de medida del contenido volumétrico de agua, el tipo de suelo se clasifica según Soil Taxonomy como un Alfisol (Typic Haploxeralf) y se encuentra sobre arenas arcósicas de grano grueso. La vegetación que soporta es similar a un pasto que no se riega y por tanto, en el verano llega a secarse. La caracterización del suelo en la zona de estudio fue realizada

con anterioridad, no obstante, se completó la información hasta llegar a los 0,85m de profundidad y se obtuvieron también los valores de contenido volumétrico de agua a Saturación, a Capacidad de campo y a Punto de marchitez. En la Tabla 1 Fign los datos más relevantes.

Tabla 1. Características del suelo

Hor	prof m x10 ²	Clase Text. USDA	Dens. ap. Mg/m ³	θ_v Pm ₁₅₀₀ m ³ /m ³	θ_v Cc ₃₃ m ³ /m ³	θ_v Sat. m ³ /m ³
A ₁₁	0-10	Franco arenosa	1,52	0,07	0,14	0,33
A ₁₂	10-22	Franco arenosa	1,66			
Bt ₁	22-35	Franco arcillo arenosa	1,63	0,16	0,26	0,57
Bt ₂	35-60	Arcillo arenosa		0,24	0,32	0,60
Bt ₃	60-80	Franco arcillo arenosa		0,19	0,28	0,58

Donde: θ_v Cc₃₃ - Contenido volumétrico de agua a 33 kPa

θ_v Pm₁₅₀₀ - Contenido volumétrico de agua a 1500 kPa

El contenido de arcilla en el perfil varía en profundidad siendo de un 10 % en el horizonte A (0-0,22m), y superior al 26% en el horizonte Bt argílico, alcanzando un contenido máximo del 36% en el horizonte Bt₂ (0,35-0,60 m).

Los valores de contenido volumétrico de agua que Fign en la Tabla 1 para la capacidad de campo (Cc) a 33kPa y el punto de marchitez (Pm) a 1500 kPa, se han calculado a partir de los valores de humedad gravimétrica obtenidos en laboratorio mediante membrana de Richards sobre muestra tamizada, y considerando la densidad aparente y el porcentaje de elementos gruesos. También se realizaron ensayos en la membrana de Richards con muestra inalterada, utilizando cilindros de 0,02m de altura y 0,05m de diámetro, los resultados fueron similares para el horizonte A, pero en el horizonte Bt de acumulación de arcilla los valores del punto de marchitez resultaron ser muy elevados, por lo que no fueron considerados.

Los valores de contenido volumétrico de agua a saturación son valores medios de los obtenidos en laboratorio por dos métodos. El método que utiliza la pasta de saturación y el método que utiliza cilindros con muestras sometidas a saturación por capilaridad. En el horizonte Bt₂ (0,35-0,60m) de máxima acumulación de arcilla, los valores obtenidos por los diferentes métodos han presentado diferencias notables ya que se trata de un horizonte con dificultades para humedecerse homogéneamente cuando se utilizan muestras sin tamizar.

Dada la gran variabilidad de la textura en el perfil del suelo y por tanto de su contenido en arcilla ya que en ocasiones aparece en forma de bandas de acumulación, se han realizado varias repeticiones en los ensayos de laboratorio. Los datos de la tabla 1 son valores medios, pero es normal que su desviación estándar asociada tome valores de 0,02 m³/m³ de humedad volumétrica e incluso superiores.

2.1.2. Estación meteorológica

Para el cálculo de la evapotranspiración de referencia de Penman-Monteith (ET_o) y de la estimación del Agua Disponible para las plantas (AD) mediante el Balance Hídrico Exponencial diario, se han utilizado datos de la estación meteorológica más próxima a la zona de instalación de los equipos. Los cálculos de AD a partir del Balance Hídrico exponencial (BHExp) se iniciaron en enero de 2007.

2.1.3. Equipos de medida de humedad de suelo

2.1.3.1. Sensores capacitivos

Los sensores que se han instalado en campo son del tipo EC-20 de Decagon. El principio de medida es capacitivo. La instalación se realizó en octubre de 2008, colocando tres sensores a las profundidades de 0,15m, 0,30m y 0,45m y se registraron datos cada tres horas durante los años 2009 y 2010. El método de obtención y tratamiento de los datos mediante datalogger y la complejidad de las calibraciones se especificó en el artículo de Botey et al. (2010). Los problemas detectados para su calibración, resultaban ser mucho mayores en el horizonte Bt argílico, con alto contenido en arcilla.

2.1.3.2. Sensores TDR (Time Domain Reflectometry)

Como sistema más preciso de medida de humedad de suelo se ha utilizado el sensor TRIME-T3 de IMKO. Se trata de un sensor que utiliza la técnica TDR ampliamente especificada en la bibliografía. En la parcela de Radiosondeo y junto a los sensores EC-20 de Decagon, se instalaron dos tubos de acceso para tomar medidas con la sonda IMKO-T3 a diferentes profundidades de forma periódica. Para poder utilizar la información de este equipo se realizó el ajuste previo que determina el fabricante IMKO y también se obtuvieron calibraciones específicas en laboratorio con muestras de cada horizonte. Dada la geometría, el tamaño de la sonda IMKO-T3 y su forma de medir, se acordó que se podía tomar una medida realizada a una determinada profundidad como el valor medio de contenido volumétrico de agua en un intervalo de +/- 0,10m de espesor (0,20m).

2.2. Métodos

2.2.1. Balance Hídrico Exponencial diario

Previamente al cálculo de la reserva de agua disponible para las plantas (AD) mediante el balance hídrico, se procede diariamente al cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_o) según el documento FAO (1998) y en base a la información meteorológica.

La ecuación general del Balance Hídrico diario y la ecuación que se aplica para un agotamiento de la reserva de humedad del suelo por método exponencial, siguen las directrices dadas por Thornthwaite y Mather (1955) y Correa y Díaz (2005), y están especificadas en Botey et al. (2009). El agotamiento de la reserva se realiza de forma exponencial. En el caso de días húmedos la reserva aumenta por acumulación directa y en el caso de días secos en los que la precipitación es inferior a la evapotranspiración de

referencia, el cálculo de la reserva de agua para un determinado día se realiza en función de la reserva del día anterior como:

$$R_i = R_{i-1} \cdot \exp(- (ET_{o_i} - P_i) / R_{m\acute{a}x}) \quad (1)$$

Donde la reserva (R_i) de agua en el suelo es AD, y por tanto, el contenido de agua del perfil del suelo hasta una determinada profundidad de enraizamiento, que se encuentra por encima del Punto de marchitez y por debajo de la Capacidad de campo. La Reserva máxima ($R_{m\acute{a}x}$) es el Agua Disponible Total para las plantas (ADT) que para una determinada profundidad debe ser estimada a partir de los valores característicos de C_c y P_m para cada espesor de suelo.

Aplicar el Balance Hídrico Exponencial (BHExp) diario requiere conocer la profundidad de enraizamiento y el comportamiento hídrico del suelo para determinar el valor del ADT. Dado que los datos obtenidos de C_c y P_m en laboratorio, pueden diferir del comportamiento real del suelo en el lugar donde se mide el contenido de agua, se calculan los balances hídricos para diferentes estimaciones del ADT. Todos los Balances Hídricos se realizan para una determinada cantidad de ADT, correspondiente a un espesor de suelo desde la superficie y hasta la profundidad de suelo considerada.

2.2.2. Tratamiento de la información obtenida de los sensores de humedad de suelo

Con el equipo IMKO-T3 y siguiendo las recomendaciones del fabricante, se toman semanalmente medidas en cada tubo, a cada profundidad y en tres direcciones, y se aplican las ecuaciones de calibración obtenidas previamente para cada horizonte del perfil de suelo. Teniendo en cuenta un espesor de 0,20m para cada medida de TDR y realizando la acumulación correspondiente, se obtuvo el contenido volumétrico de agua para diferentes espesores de suelo (0 a 0,25m, 0 a 0,45m, 0 a 0,65m y 0 a 0,85m).

Se tomaron muestras de suelo para determinar el contenido volumétrico de agua en los primeros 0,05m de espesor, pero el resultado fue una gran variabilidad, lo que determinó que la estimación de la cantidad de AD en los primeros 0,05m fuera sustituida por los valores resultantes del balance hídrico para un ADT de 4 (l/m²), valor estimado a partir de las características del suelo (Tabla 1). Los problemas existentes al intentar medir contenido de humedad volumétrica de suelo cerca de la superficie ya habían sido puestos de manifiesto por Ferré y Topp (2002).

Para el cálculo del ADT (Agua Disponible Total para las plantas) y del AD (Agua disponible para las plantas en cada fecha), se han utilizado diferentes estimaciones de los valores de C_c y P_m . Los diferentes valores de ADT obtenidos para cada profundidad fueron el resultado de considerar los siguientes casos:

Estimación A:

Los valores de C_c y P_m son los obtenidos de los

ensayos del laboratorio para cada intervalo de profundidad de suelo.

Estimación B:

Los valores de Cc y Pm se estiman a partir de las gráficas con los valores de contenido de humedad obtenidos con el sensor TDR (IMKO-T3) y considerando también los datos de laboratorio.

Estimación C:

Para cada profundidad de suelo, el valor de Cc es sustituido por el máximo valor registrado a ese nivel de profundidad y el Pm por el mínimo.

Las medidas del TDR de contenido volumétrico de agua a 0,15m, 0,30m y 0,45m se utilizaron para comparar con las medidas obtenidas por los sensores capacitivos EC-20 de Decagon, y las medidas a 0,15m, 0,35m, 0,55m y 0,75m, fueron las medidas principales para calcular valores de ADT a diferentes profundidades.

3.- Resultados

3.1. Contenidos volumétricos de humedad de suelo

3.1.1. Contenidos volumétricos con equipo TDR IMKO-T3.

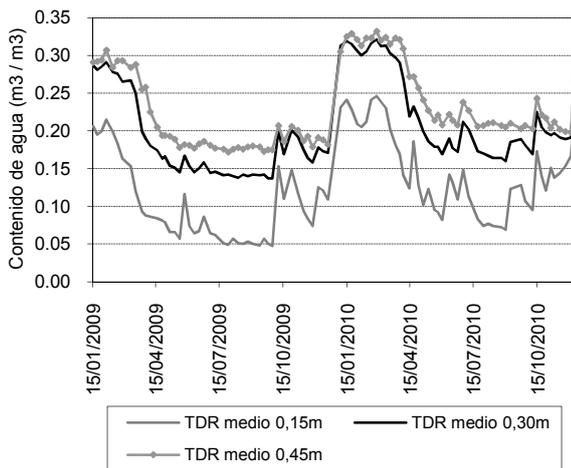


Fig 1. Contenido de agua a 0,15m , 0,30m y 0,45m de medidas TDR

Para cada nivel de profundidad se obtuvieron primeramente los datos procesados del TDR tanto el valor medio para cada día de muestreo, como la desviación estandar con las 3 medidas que se toman del tubo 1 y las tres medidas que se toman del tubo 2 para cada profundidad. Los valores de la desviación estandar tomaron un valor medio de 0,01 m³/ m³ , alcanzando el 0,016 para una profundidad de 0,45m y el 0,015 para 0,75m.

Las medidas obtenidas ponen de manifiesto la diferente capacidad de retención de agua de los diferentes horizontes del suelo, que confirman que existen grandes diferencias entre la Cc y el Pm en cada nivel. Como ejemplo en la Fig 1 se exponen los datos obtenidos con el equipo TDR previamente procesados, para los niveles de 0,15m, 0,30m y 0,45m. Estos niveles coinciden con la profundidad a la que se han ubicado los sensores EC-20 de Decagon.

3.1.2. Contenidos volumétricos con equipos capacitivos EC-20 de Decagon.

Los valores obtenidos con los sensores EC-20 de Decagon instalados a 0,15m , 0,30m y 0,45m de profundidad, se correlacionaron con los valores procesados del TDR obtenidos a la misma profundidad (nº de registros=92). Como cabía esperar de los estudios realizados anteriormente la correlación fué mejor para una profundidad de 0,15m (R²=0,91) que se corresponde con una textura franco arenosa y empeoró (R²=0,81 para 0,30m y R²=0,556 para 0,45m) a medida que aumentaba la profundidad debido al aumento del contenido de arcilla

Tabla 2. Valores de Cc y Pm a cada profundidad para las tres estimaciones.

Prof m	Tipo de estimación	Pm m ³ /m ³	Cc m ³ /m ³
0,15	A	0,07	0,15
	B	0,07	0,21
	C	0,05	0,25
0,35	A	0,20	0,29
	B	0,18	0,33
	C	0,17	0,34
0,55	A	0,22	0,30
	B	0,19	0,30
	C	0,17	0,31
0,75	A	0,16	0,25
	B	0,16	0,26
	C	0,15	0,26

3.2. Valores de ADT para diferentes profundidades.

Después de asignar el contenido de agua en el suelo para la Cc y el Pm en cada profundidad (Tabla 2) y para las tres estimaciones mencionadas en el apartado 2.2.2.1., se procedió al cálculo del ADT en l/m². Los valores de ADT calculados para los espesores de 0 a 0,25m y de 0 a 0,65 m se muestran en la tabla 3. El AD (l/m²) en cada día de muestreo a partir de los datos del TDR, para los mismos espesores y desde la superficie del terreno, se calculó como el contenido de agua existente en el suelo en el intervalo desde Cc y hasta Pm.

3.3. Comparaciones con Balances Hídricos

Se han elegido para presentar en éste apartado como más representativos los resultados de realizar la comparación entre los valores de AD obtenidos mediante el BHExp diario para las tres estimaciones de ADT y los valores de AD obtenidos a partir de las medidas de TDR realizadas en campo, para dos espesores de suelo desde la superficie hasta los 0,25m de profundidad o hasta los 0,65m. Como ejemplo en la Fig 2 se representan para los dos años de campaña desde el 1/01/2009, los valores obtenidos de AD estimados y medidos, así como los valores de la precipitación (-) y de la ETo (-), para la estimación B y para un espesor de suelo desde la superficie de 0,65m (ADT= 84 l/m²), todo con las mismas unidades (l/m²).

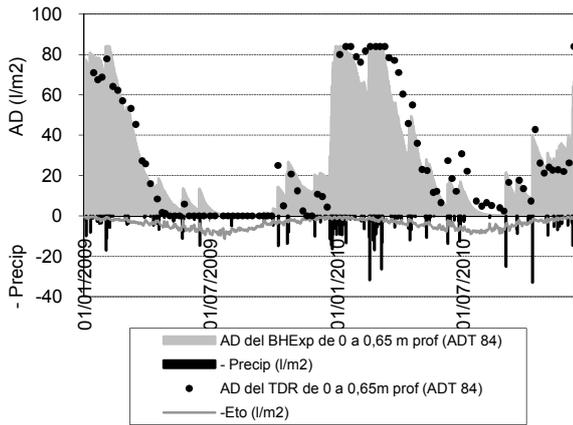


Fig 2. Agua Disponible (l/m^2) obtenida del BHExp diario suponiendo la estimación B (ADT de $84 l/m^2$) y valores de AD obtenidos de las mediciones con el TDR, para un espesor de suelo desde la superficie hasta 0,65m de profundidad.

Se aprecia en la Fig 2 que las diferencias entre valores medidos y estimados son pequeñas y que el primer verano fué mucho más seco que el segundo.

En la tabla 3 se presenta un resumen estadístico sobre la serie de diferencias entre los valores medidos y estimados de AD, así como de la regresión. Los peores resultados se obtienen con la estimación A en la que se utilizan los valores de Cc y Pm obtenidos de ensayos de laboratorio. El ADT en este caso es menor, el valor medio de las diferencias (m^3 de agua/ m^3 de suelo) es de 0,017 y R^2 es 0,71. Para la estimación B y la estimación C los resultados mejoran siendo el valor medio de las diferencias $<0,01$ y $R^2 \geq 0,90$. La estimación C se corresponde con los mayores valores de ADT y aunque las comparaciones sean buenas no es correcto tomar como Cc y Pm los valores extremos ya que el contenido de agua en el suelo en la realidad puede estar por encima de Cc o por debajo del Pm.

En la tabla 4 se presenta el número de días con humedad de suelo por encima de la Cc y por debajo del Pm para las tres estimaciones y para los dos espesores de suelo seleccionados calculados a partir de los datos de AD obtenidos diariamente del BHExp diario durante los dos años de estudio.

Tabla 3. Resumen estadístico para cada una de las tres estimaciones y dos espesores de suelo, de la serie de diferencias entre los valores de AD obtenidos de las medidas con TDR y los valores estimados a partir del BHExp, así como de la regresión.

	Tipo de estimación de ADT					
	A		B		C	
	Espesor 0-0,25 (m)	Espesor 0-0,65 (m)	Espesor 0-0,25 (m)	Espesor 0-0,65 (m)	Espesor 0-0,25 (m)	Espesor 0-0,65 (m)
ADT(l/m^2)	20	54	32	84	44	106
ADT/espesor (m^3/m^3)	0,080	0,083	0,128	0,129	0,176	0,163
Nº reg.	92	92	92	92	92	92
D(TDR-BH) (m^3/m^3)	0,017	0,002	0,009	0,000	0,009	-0,001
Desv Est (m^3/m^3)	0,018	0,015	0,014	0,013	0,015	0,014
Máx Dif (m^3/m^3)	0,068	0,052	0,051	0,037	0,044	0,037

Min Dif (m^3/m^3)	-0,003	-0,024	-0,016	-0,023	-0,031	-0,037
% Media de Dif. sobre ADT/espesor	21,2	2,4	7,0	0,0	5,1	-0,6
R^2 TDR-BH	0,71	0,82	0,90	0,92	0,93	0,93
Error Típico	0,017	0,015	0,013	0,013	0,013	0,013

Donde:

D TDR-BH: Valor medio de las diferencias (TDR-BH) (m^3/m^3)

R^2 TDR-BH: R^2 de la regresión entre valores TDR y valores del BHExp

Tabla 4. Número de días con humedad de suelo por encima de la Cc y por debajo del Pm del BHExp diario en los dos años de estudio, para las tres estimaciones y para dos espesores de suelo

Espesor de suelo e (m)	Tipo de estimación de ADT	ADT (l/m^2)	Nº de días por encima de Cc	Nº de días por debajo de Pm
0-0,25	A	20	39	174
	B	32	35	124
	C	44	32	102
0-0,65	A	54	32	90
	B	84	26	42
	C	106	22	21

4.- Discusión

Las diferentes estimaciones del ADT van unidas a la dificultad de determinar con precisión los valores de Cc y Pm para una determinada profundidad de suelo y desde la superficie. La Cc ha sido definida en el Glosario de Términos de Ciencia del Suelo (Soil Scienci Society of America, 1997), como “el contenido de agua gravimétrico o volumétrico que queda en el suelo después de saturado y dejado drenar durante dos o tres días, hasta que el drenaje libre sea inapreciable” (Romano y Santini, 2002). Existe amplia información en la bibliografía sobre la manera de obtener los valores de contenido de agua en el suelo a Cc, Pm y Saturación con ensayos de laboratorio mediante la curva de retención de humedad o estimando dichos valores a partir de regresiones realizadas utilizando diferentes características físicas del suelo (textura, materia orgánica, densidad aparente, ...), como ponen de manifiesto los artículos de Martínez y Ceballos (2001). Pero también hay diversos autores que recomiendan que las determinaciones se realicen en campo como muestra Cabot et al. (2009) y Gebregiorgis y Savage (2006). En el caso que nos ocupa la presencia de un horizonte A de textura franco arenosa sobre un horizonte Bt de acumulación de arcilla con diferente velocidad de infiltración, provoca que el drenaje del conjunto de los dos horizontes sea más lento y por tanto el valor de la Cc estimado de la gráfica de contenido de humedad del suelo con las medidas de campo, pueda ser bastante superior al obtenido para cada horizonte con las técnicas de laboratorio.

En cuanto al valor del Pm su posible variación es menor, pero desviaciones de $0,02 m^3/m^3$ son posibles ya que

existen también en las medidas de laboratorio.

En la actualidad es importante conocer como se ha obtenido la información disponible sobre perfiles de suelo con valores de Cc y Pm, ya que ésta se está utilizando en técnicas edafométricas de predicción espacial para generar cartografías digitales como en los trabajos de Rodríguez Álvarez (2009). Dichas cartografías proporcionarán parámetros de entrada para los diferentes modelos distribuidos hidrológicos o modelos de humedad de suelo, como son GIS-BALAN, MORECS, ISBA, LISFLOOD, etc.

Del mismo modo que según Soil Taxonomy (1999), para estudiar el régimen de humedad de los suelos se estudia el contenido de humedad en la sección control establecida según el alcance de cantidades fijas de agua en el suelo y no según profundidades fijas para todos los suelos, también para estudiar la variabilidad del clima en cuanto al régimen de humedad es útil estimar AD a partir del Balance Hídrico Exponencial para diferentes niveles de ADT que en cada suelo corresponderían a unas determinadas profundidades según las características físicas del perfil del suelo.

5.- Conclusiones

El muestreo de la humedad del suelo siempre en la misma ubicación mediante el equipo TDR IMKO T3 ha permitido poder determinar el comportamiento del BHExp diario en éste tipo de suelo (Typic Haploxeralf), eliminando los problemas de variabilidad introducidos con el muestreo mediante la extracción de cilindros de muestra inalterada.

A pesar de la existencia en el perfil del suelo de diferentes horizontes con una capacidad muy diferente de retención de agua, el contenido de ADT expresado en m^3/m^3 varía poco a lo largo del perfil del suelo para un mismo tipo de estimación del ADT. Por tanto, en este suelo es idóneo trabajar con Balances Hídricos que consideren la reserva como reserva de AD y la Reserva máxima como el ADT.

Los resultados indican que es difícil estimar correctamente el ADT para cada espesor de suelo y que en éste caso la mejor de las tres estimaciones es la estimación B. En ésta estimación los valores de Cc son mayores que los del laboratorio y se corresponden con contenidos estables de humedad visualizados en las gráficas y los valores del Pm son un poco inferiores a los del laboratorio. Es importante no tomar valores del Pm excesivamente bajos ya que se disminuye en gran medida el nº de días en que el suelo se encuentra por debajo del Pm, lo que conduce a conclusiones erróneas. Haber obtenido valores medios de las diferencias $<0,01$ con una desviación estándar $<0,015$ son resultados muy satisfactorios ya que las mismas medidas del TDR tienen una desviación estándar cercana al $0,01$. De todo lo expuesto se deduce la gran importancia de realizar una estimación adecuada del ADT para cada profundidad.

6.- Bibliografía

Almorox, J. 2003. Climatología aplicada al medioambiente y agricultura. Publ. ETSIA. Madrid.

- Correa, A.F. y Díaz, C.H. 2005. Implementación del modelo de Thomas para el balance hídrico empleando la herramienta computacional hidrosig-java. Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería. Bogotá, D.C. (<http://www.javeriana.edu.co/biblios/tesis120.pdf>)
- Botey, R, Moreno, J.V. y Pérez, J. 2009. Monitorización de la humedad del suelo en tres observatorios meteorológicos (campana 2007-2008) 102 pág. AEMET, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- Botey, R, Moreno J.V. y Pérez J. 2010. Comparing different instrumentation for measuring soil water content in a Typic Haploxeralf in central Spain. The third International Symposium on Soil Water Measurement Using Capacitance, Impedance and Time Domain Transmission. April 2010. Murcia (Spain).
- Cabot, O., Ferrer, F., FonsecaF., RodrigoG., Domene, M., Tous, D., Iglesias N. y Villar, J.M. 2009. Best Management Practices (BMPs) for using soil moisture probes for on-farm irrigation scheduling decisions. Post,r exhibited at VI International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops. Nov 2009. Viña del Mar, Chile.
- F.A.O. 1998. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. Roma. págs 298.
- Ferré, P.A. y Topp, G. C. 2002. Methods for Measurement of Soil Water Content: Time Domain Reflectometry. págs.435-446. In J.H. Dane, and G.C. Topp (ed) . Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods. Soil Science Society of America, Inc.
- Gandullo, J.M. 2000. Climatología y Ciencia del suelo. ETSIM. Fundación Conde Valle de Salazar. Madrid.
- Gebregiorgis, M.F. y Savage, M.J. 2006. Field, laboratory and estimated soil-water content limits. Water SA, 32, Nº 2: 155-161.
- Martínez, J. y Ceballos, A. 2001. Estimación de propiedades hídricas de los suelos mediante el uso de funciones de edafo-transferencia. Temas de investigación en Zona no saturada. Pamplona.
- Martínez, J., Sanchez, N., Pérez, C., y Baroncini, G. 2009. Humedad del suelo y variabilidad con diversas estrategias de muestreo: un caso de estudio en la Cuenca del Duero. Estudios en la Zona no Saturada del Suelo. Vol IX. Barcelona.
- Ministerio de Medio Ambiente. 2006. Guía para la elaboración de estudios del medio físico. Publ. MMA. Madrid. págs 917.
- Rodríguez, A. 2009. Inferencia espacial de propiedades físico químicas e hidráulicas de los suelos de Andalucía. Estudios en la Zona no saturada del suelo. Vol IX. Barcelona.
- RCS-USDA Soil Survey Staff (1975, 2003) 1999. Soil Taxonomy. Department Agriculture. Handbook nº 436 . págs 869.
- Romano, N. y Santini, A. 2002. Field water capacity. Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods. SSSA Book Series. 5. pp. 723.