

HUMEDAD DEL SUELO Y VARIABILIDAD CON DIVERSAS ESTRATEGIAS DE MUESTREO: UN CASO DE ESTUDIO EN LA CUENCA DEL DUERO

José Martínez Fernández, Nilda Sánchez Martín, Carlos Pérez Gutiérrez y Guido Baroncini
Turricchia

Centro Hispano Luso de Investigaciones Agrarias. Universidad de Salamanca. c/ Duero, 12. 37185 Villamayor
e-mail: jmf@usal.es, web: <http://www.usal.es/hidrus>

Palabras clave: Humedad del suelo, muestreo, variabilidad, cuenca del Duero

RESUMEN. *En este trabajo se hace un análisis comparativo de la estimación de la humedad del suelo media y su variabilidad a partir de los datos obtenidos con diferentes estrategias de muestreo en una misma zona. El estudio se llevó a cabo en REMEDHUS (Red de Estaciones de Medición de la Humedad del Suelo de la Universidad de Salamanca), situada en el sector central de la Cuenca del Duero, sobre una superficie aproximada de 1300 km². Desde 1999 se dispone de una red estaciones a las que se incorporaron en 2005 sondas de capacitancia que miden la humedad del suelo en continuo, con registros cada hora. Esto ha permitido poder pasar de mediciones manuales cada catorce días, a mediciones horarias. Por otro lado, en la primavera de 2008 se seleccionaron 65 parcelas representativas de los usos del suelo de la zona, en las que se pudiera hacer un seguimiento periódico y manual del contenido de agua del suelo. En estas parcelas se ha medido la humedad del suelo de 0-5 cm de profundidad en nueve días distribuidos entre mayo y noviembre de 2008 y se ha comparado con la humedad medida en la red permanente. Dicho periodo fue elegido con el objeto de recoger todo el rango de contenidos de humedad y las situaciones más contrastadas, como así se pudo comprobar a posteriori. De los resultados del estudio se observa que existe una gran similitud en el valor de la humedad media obtenido con ambas estrategias de muestreo. Esto es así, además, para los diferentes contenidos de agua del suelo. De esta circunstancia se infiere la representatividad de la red permanente para la estimación de la humedad media de la zona. Al mismo tiempo, se han comparado los patrones de variabilidad de la red preestablecida y la red automática, y se han observado algunas diferencias en relación con el diferente muestreo temporal. Se ha realizado también un análisis de la persistencia de los patrones de distribución espacial de la humedad del suelo.*

ABSTRACT. *In this work has been made a comparative analysis of the mean soil moisture estimation and their variability from the data collected with different sampling strategies. The study was carried out in REMEDHUS (Soil Moisture Measurement Stations Network of the University of Salamanca), located in the central sector of the Duero basin, on a surface of around 1300 km². There is a network stations in operation since 1999 and recently (2005) a set of permanent capacitance probes was installed. This equipment enabled to progress from manual measurements every fourteen days, to hourly measurements. On the other hand, in the spring of 2008 65 representative agricultural plots of the zone were selected, in which a periodic and manual survey of the soil water content could be done. In these plots the soil moisture content at 0-5 cm depth in nine days distributed between May and November of 2008 was measured and has been compared with the soil moisture measured in the permanent network. This period was chosen with the aim of having all the range of water contents, as it was verified later. The results of the study show a great similarity in the mean soil moisture obtained with both sampling strategies. This is thus, in addition, for the different soil water contents. Therefore, the representativeness of the permanent pre-established measurement network for the mean soil moisture estimation is inferred. At the same time, the variability patterns of the pre-established network and the automatic network have been compared and differences in relation to the temporal sampling interval have been observed. An analysis of the persistence of the spatial distribution patterns of the soil moisture has also been made.*

1. INTRODUCCIÓN

El contenido de agua del suelo es una variable de estado clave para entender un gran número de procesos hidrológicos. La humedad edáfica es uno de los principales factores en la dinámica infiltración/escorrentía. Interviene directamente en la separación de la radiación neta entre calor sensible y latente. Determina la cantidad de agua disponible para la evapotranspiración. Controla el flujo subsuperficial y la migración de agua y productos químicos hacia el acuífero. La humedad antecedente del suelo en una cuenca es un factor clave en la modelización hidrológica (Beven 2001). El conocimiento del comportamiento de la humedad del suelo y su distribución espacio-temporal aporta una información esencial para los modelos climáticos.

La variabilidad de los procesos hidrológicos es, desde hace tiempo, un tema clave de investigación. El análisis de la variabilidad de la humedad del suelo ha centrado la atención de una parte importante de la producción científica en este ámbito. Desde el trabajo pionero de Nielsen et al. (1973), y un buen número de investigaciones posteriores, se ha prestado una gran atención al estudio de la variabilidad espacial de las propiedades hídricas de los suelos. El análisis de la variabilidad temporal conoció un gran impulso a partir de la aparición del conocido artículo de Vachaud et al. (1985). En ese trabajo se introdujo el concepto de estabilidad temporal como la asociación temporal invariable entre localización espacial y valores estadísticos paramétricos clásicos de una determinada propiedad del suelo. Este enfoque permite determinar qué puntos de muestreo expresan el comportamiento medio de toda la zona estudiada (Martínez-Fernández y Ceballos, 2005), y cuáles son característicos de los valores extremos. De esta forma, la estabilidad temporal de la humedad del suelo es el reflejo de la persistencia temporal de la estructura espacial (Kachanoski y de Jong, 1988).

Debido a la utilización de herramientas de análisis cada vez más potentes (modelización y teledetección), se hace cada vez más necesario conocer cual es el comportamiento espacio/temporal de la humedad del suelo sobre territorios más amplios y durante periodos de tiempo prolongados. Las alternativas que se plantean a la medición puntual *in situ* son la estimación mediante teledetección y la modelización. Ambas metodologías requieren de las mediciones *in situ* para las fases de calibración y validación. Sin embargo, la variabilidad espacio/temporal de la humedad del suelo puede introducir una incertidumbre sistemática en las estimaciones de dicha humedad a partir de sensores remotos (Mohanty y Skaggs, 2001). La estimación eficiente y precisa es el principal componente de los programas de validación de la estimación de humedad del suelo mediante satélite (Cosh et al. 2006)

En este trabajo se analiza el comportamiento de la humedad del suelo con diversas estrategias espacio/temporales de muestreo, en términos de estimación del valor medio de la zona y de su variabilidad, en un sector del centro de la Cuenca del Duero. La superficie de la zona de estudio es equivalente a la del píxel (entre 25-40 km) de diversos sensores remotos de programas espaciales (METOP-ASCAT, SMOS, SMAP), actualmente operativos o en desarrollo, y que tienen por objeto estimar la humedad del suelo a escala global con cortos periodos de revisita. Los objetivos del trabajo han sido: comparar la estimación de la humedad media con dos muestreos espaciales diferentes en la misma zona; analizar la persistencia temporal de los patrones de distribución de la humedad del suelo; y comparar el comportamiento de la variabilidad con dos muestreos temporales diferentes.

2. ZONA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA

La zona de estudio se encuentra al SE de la provincia de Zamora, y abarca también dos pequeños sectores del W de la de Valladolid y del NE de la de Salamanca. Coincide, aproximadamente, con la comarca agrícola denominada La Guareña. El territorio estudiado ocupa una superficie de unos 1300 km², dedicada casi en su totalidad a usos agrícolas. En él se encuentra instalada desde 1999 la Red de Estaciones de Medición de la Humedad del Suelo de la Universidad de Salamanca (REMEDHUS), compuesta, además de otros dispositivos climáticos e hidrológicos, por 20 estaciones de medición de humedad del suelo (Martínez-Fernández, Ceballos 2003). La distribución de las estaciones se hizo atendiendo a criterios edafológicos, topográficos y de usos del suelo. Aunque el contexto bioclimático es el mismo, todas las estaciones son independientes desde el punto de vista hidrológico. A la infraestructura originaria de la red (perfiles con sondas TDR a 5, 25, 50 y 100 cm de profundidad, con mediciones quincenales), en la primavera de 2005 se incorporó a cada estación una sonda de capacitancia Hydra (Stevens Water Monitoring Systems Inc., Portland, OR) a cada estación, para medir

humedad y temperatura de suelo a 0-5 cm de profundidad. Estas sondas registran dichas variables cada hora y la información es recibida en un servidor mediante un sistema de transmisión remota de datos. En este estudio se han utilizado los valores medios diarios de los años 2006 a 2008. Como complemento a REMEDHUS, en la primavera de 2008 se seleccionaron un total de 65 parcelas en la misma zona, con el objeto de contar con una red de puntos de control de la humedad del suelo para la realización de campañas intensivas de medición y para su utilización en labores de estimación humedad del suelo con sensores remotos a distintas escalas. En cada una de esas parcelas se hicieron 9 muestreos entre los meses de mayo y noviembre de 2008, cubriendo un rango bastante amplio de situaciones y contenidos de agua en el suelo. Cada dato de humedad de esos muestreos es la media de cuatro mediciones aleatorias de la humedad del suelo entre 0-5 cm de profundidad, en puntos distantes al menos 25 m del borde la parcela. Las mediciones se hicieron de forma manual con sondas Theta-ML2x (Delta-T Devices Ltd. Cambridge, K). La suma de ambas redes, conlleva la medición de la humedad del suelo en 85 puntos sobre una superficie de unos 1300 km² aproximadamente.

Para el análisis de la variabilidad de la humedad del suelo se ha utilizado el cálculo de la varianza de cada medición. En el caso de la red de sondas Hydra, se ha calculado primero la media diaria para cada día y estación, y posteriormente la varianza para cada fecha de medición. Para ver el patrón de variabilidad se han comparado los valores de varianza con los de humedad media de cada día. Para el análisis de la persistencia de los patrones de distribución espacial, se ha calculado el coeficiente de correlación (Test no paramétrico de Spearman) de la humedad media de un día con la del día previo, con la de 7 días antes y con la que había 14 días antes.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como ya se ha señalado, uno de los objetivos de la selección de una red de parcelas en REMEDHUS fue el de poder llevar a cabo campañas intensivas periódicas, que pudieran servir de base para una verificación del cálculo de la humedad media de la zona obtenida con la red Hydra. Por tanto, se buscaba profundizar en la representatividad del valor medio de humedad que se obtiene con la red permanente de estaciones. El periodo de muestreo elegido (Mayo-Noviembre de 2008) permitió registrar el rango más amplio de contenidos de agua en el suelo en la zona. Se cuenta con datos en la red Hydra desde 2005 y se mide con la red TDR desde 1999, lo que permite tener una cierta seguridad en relación con dicho rango. Por tanto, se registraron situaciones que iban desde condiciones muy secas a muy húmedas, próximas a los valores máximos y mínimos registrados en las series anuales.

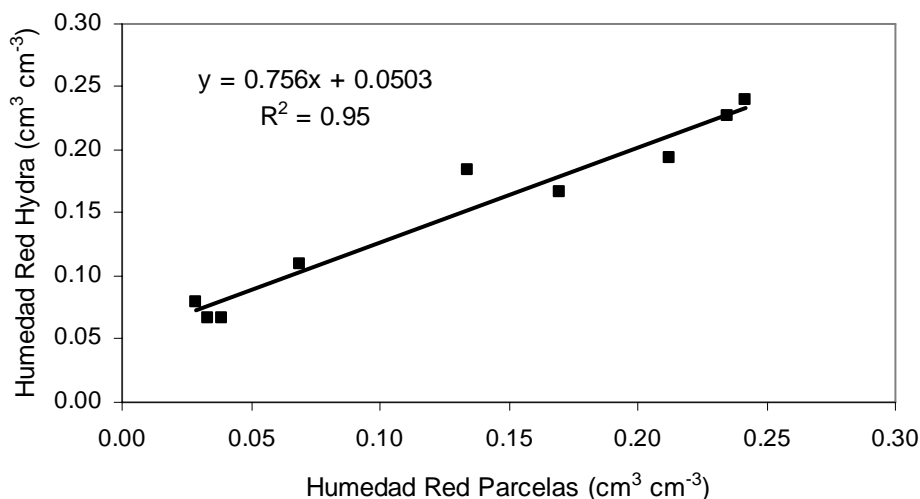


Figura 1. Relación entre la humedad media 0-5 cm en la red de sensores Hydra de REMEDHUS (20 estaciones) y en la red de parcelas (65 puntos de muestreo), para las mediciones realizadas entre el 20 de mayo y el 21 de noviembre de 2008

La comparación entre el valor medio registrado en la red Hydra y el obtenido en las mediciones de la red de parcelas (Fig. 1) da un resultado sumamente satisfactorio. El grado de ajuste de las dos series de datos es muy bueno ($R^2=0.95$, $p>0.001$). No hay que olvidar que el de la red de parcelas es un muestreo aleatorio, en el que únicamente se tuvo en cuenta que estuvieran representados todos los usos y tipologías de suelo de la zona de estudio. El tipo de sensor en los dos muestreos y el modo de medición (manual frente automático), son distintos, pero el volumen de suelo en la zona de influencia de las sondas es similar. Las únicas diferencias reseñables en los valores se han dado cuando el suelo estaba muy seco, siendo, en esas condiciones, inferior la humedad en la red de parcelas. En cualquier caso, la diferencia no ha superado el 4% vol., estando, por tanto, por debajo de valores considerados aceptables en otros trabajos (Cosh et al. 2008)

Aunque el número de mediciones de esta campaña en la red de parcelas es reducido (nueve días), se ha comparado la varianza de cada uno de esos días con el valor de la humedad media correspondiente, con el objeto de determinar la presencia de un patrón de variabilidad en esta nueva estrategia de muestreo utilizada en REMEDHUS. A pesar de la restricción del número de datos, se observa (Fig. 2) una clara relación lineal directa entre varianza y media. La variabilidad espacial aumentó claramente a medida que el suelo contenía más humedad. En cualquier caso, los valores de varianza son bastante bajos, incluso para los casos en los que el suelo estaba próximo a su valor máximo de contenido de humedad.

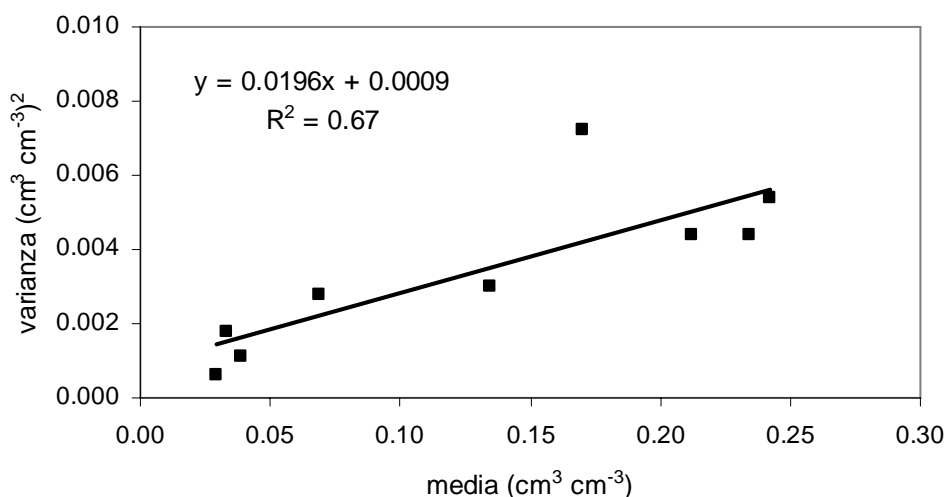


Figura 2. Relación entre humedad del suelo (0-5 cm) media y varianza en el muestreo realizado en la red de parcelas entre mayo y noviembre de 2008

El hecho de poder contar con una serie de datos diarios de más de tres años en el caso de la red Hydra, permitió llevar a cabo un análisis de este tipo, pero mucho más exhaustivo. Se comparó la humedad media con la varianza diaria obtenida en las 20 estaciones de dicha red para los años 2006, 2007 y 2008. El resultado de dicho análisis muestra (Fig. 3) que existe una relación directa no lineal, muy bien definida, entre contenido de agua en el suelo y varianza. Habida cuenta del número de datos y de la duración del periodo de muestreo (tres años), se puede afirmar con cierta seguridad que esa relación refleja el patrón de variabilidad de la humedad del suelo en esta zona. La variabilidad aumenta cuando lo hace la cantidad de agua del suelo. Dicho patrón evidencia la presencia de dos zonas de comportamiento, cuyo límite parece situarse entorno al valor de $0.15 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ de humedad (curiosamente el contenido medio humedad a capacidad de campo en los suelos de la red es precisamente ese valor). Por debajo de esa humedad del suelo

la variabilidad es muy baja y apenas varía. Por encima, el valor de la varianza aumenta rápidamente y la dispersión de los datos se incrementa notablemente. Famiglietti et al. (1998) encontraron también un patrón similar y constataron el aumento progresivo de la dispersión de los valores a medida que la humedad del suelo aumentaba.

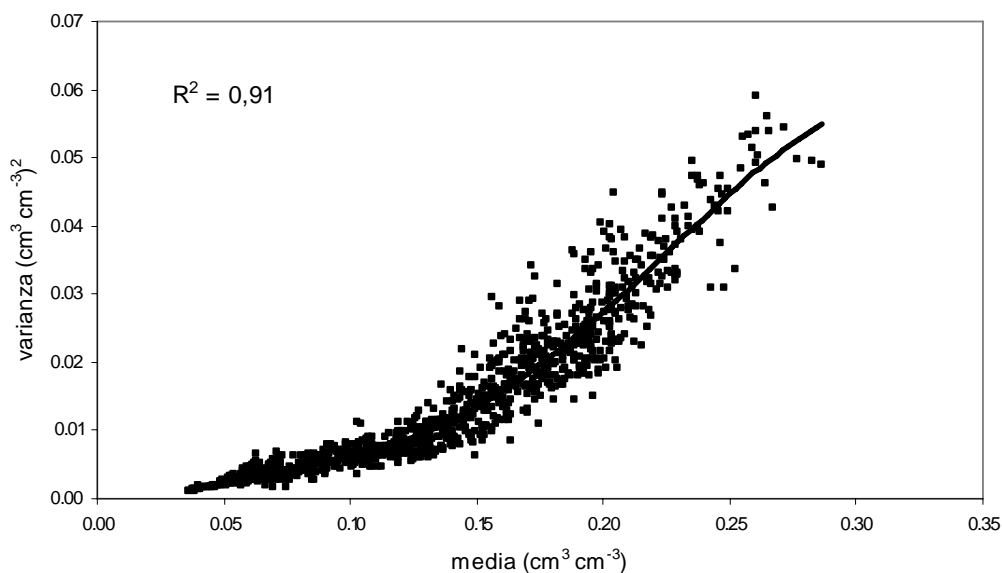


Figura 3. Relación entre humedad del suelo media y varianza. Datos diarios de la red Hydra en los años 2006, 2007 y 2008.

Respecto a la relación entre contenido de humedad del suelo y variabilidad, han existido posturas contrapuestas entre diferentes autores. Ha habido trabajos en los que sus autores mostraban la existencia de una relación inversa (Van Besesbeeck y Kachanoski, 1988; Gómez-Plaza et al. 2000; Qiu et al 2001; Hupet y Vanclooster, 2002), es decir, un aumento de la variabilidad a medida que el suelo estaba más seco. Bien es verdad que se trata de trabajos en los que hay una gran variedad de escalas espaciales y de duración de las series temporales empleadas. Otros autores, sin embargo, encontraron una relación directa entre variabilidad y cantidad de agua presente en el suelo (Robinson y Dean, 1993; Famiglietti et al. 1998; Martínez-Fernández y Ceballos, 2003; Martínez-Fernández et al. 2003). Llorens et al. (2003) en un estudio realizado durante cuatro años en un área de montaña con un muestreo semanal, hallaron una relación más compleja entre humedad del suelo y variabilidad. Estos autores encontraron que existía una relación directa que se invertía, a partir de un determinado valor, para contenidos muy altos de agua en el suelo. Martínez-Fernández et al. (2003) encontraron un resultado similar, también en una zona forestal y con muestreo quincenal. Esta circunstancia puede estar relacionada con el hecho de que, en ambos casos, determinados suelos de las respectivas zonas de estudio se saturaban por completo.

Resulta interesante reseñar que en la zona de REMEDHUS se hizo anteriormente un estudio sobre la variabilidad espacio/temporal del contenido de agua en el suelo (Martínez-Fernández y Ceballos, 2003), pero empleando una serie de datos de tres años de la primitiva red de estaciones TDR. Como ya se ha dicho, las localizaciones de las estaciones de ambas redes coinciden. Con los datos del primer año de funcionamiento simultáneo de ambas, se hizo un análisis comparativo de la estimación de la humedad media de la zona y el grado de ajuste fue sumamente satisfactorio ($R^2=0.97$, RMSE 1.6% vol.). Las diferencias fundamentales de los dos dispositivos experimentales estriban en el tipo de sonda (manual TDR frente a automática Hydra), el volumen de suelo muestreado (las sondas TDR tienen 25 cm de longitud y

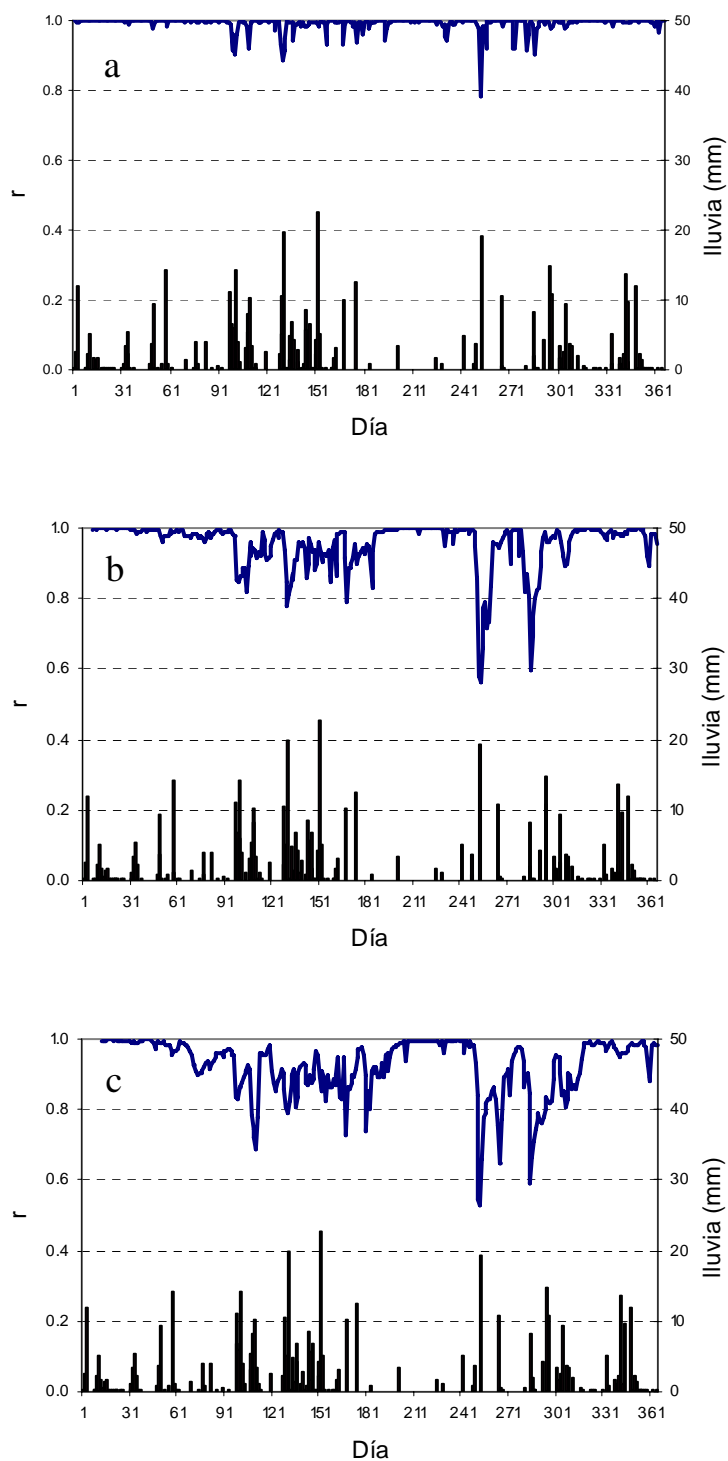


Figura 4. Coeficiente de correlación (eje horizontal superior) entre la humedad medida en las estaciones de la red Hydra entre un día y el día anterior (a), siete días antes (b), y catorce días antes (c). En el eje horizontal inferior está representada la lluvia diaria. Año 2008.

las Hydra 5 cm) y el intervalo de muestreo, pues en la red TDR se mide la humedad quincenalmente, mientras que en la otra se registran datos cada hora (aquí se utilizan datos diarios). En la práctica, el intervalo temporal de muestreo es la diferencia fundamental. A pesar de todo, el patrón de variabilidad obtenido en dicho estudio fue similar, en términos generales, pues también se encontró una relación directa entre contenido de humedad del suelo y variabilidad. Sin embargo, en aquel trabajo la relación encontrada fue lineal, la dispersión de los datos mayor y la variabilidad espacio/temporal más elevada. El paso de un muestreo quincenal a diario, explicaría probablemente las diferencias encontradas en los dos análisis. En el caso del muestreo realizado en la red de parcelas (Fig. 2), con un intervalo temporal irregular de entre 13 y 51 días de separación entre mediciones consecutivas, la relación entre media y varianza también ha sido lineal.

El estudio de la persistencia de los patrones de distribución de la humedad del suelo a lo largo del tiempo se puede utilizar para restituir series temporales (Guber et al. 2008), para optimizar el número de puntos de medición (Schneider et al. 2008), y resulta de utilidad cuando no se dispone de estaciones de medición permanentes o cuando se realizan muestreos a intervalos irregulares. Un ejemplo de esto último sería la utilización de sensores remotos, cuyo paso sobre una determinada zona de interés ocurre a intervalos de tiempo, no siempre regulares, que oscilan entre unos pocos días o semanas. El análisis de persistencia de dichos patrones permitiría establecer si un determinado muestreo de humedad del suelo podría ser utilizado con objetivos de calibración o validación, a pesar de que la fecha del paso del satélite no coincidiera con la del muestreo. Con los datos de la red permanente de sensores Hydra se ha realizado un análisis de persistencia de los patrones de distribución de la humedad del suelo, utilizando los datos medios diarios de los años 2006 a 2008. Se ha calculado el coeficiente de correlación de la humedad media de un día, medida en 20 estaciones, con la del día anterior, con la de una semana antes y con la de dos semanas antes. En la figura 4 se muestra el resultado correspondiente a 2008, a modo de ejemplo, ya que los otros dos años analizados evidenciaron un comportamiento similar. Con los tres intervalos temporales el coeficiente de correlación es muy alto casi permanentemente, por encima de 0.8 la mayor parte del tiempo. Se observa que después de los episodios lluviosos el coeficiente cae, aunque casi siempre se mantiene en valores altos, y vuelve a aproximarse a 1 inmediatamente después de que el evento cesa y comienza una nueva racha seca. Únicamente se altera sustancialmente dicho patrón de persistencia cuando se producen episodios de lluvia de consideración, después de rachas secas prolongadas, sobre todo a finales del verano. Los días de lluvia abundante que se producen cuando el suelo está muy seco, momento en el que se ha visto que la variabilidad es mínima, rompen el patrón de distribución espacial. Esto es así porque, por un lado, los suelos van a manifestar de manera más clara sus diferentes propiedades hídricas al humectarse partiendo de esas condiciones de sequedad previa (no hay que olvidar que se trata de los primeros 5 cm del suelo) y, por otro, porque ese tipo de eventos lluviosos suelen tener una distribución espacial sumamente irregular.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha comprobado la representatividad de una red permanente de estaciones de medición de la humedad del suelo. La selección de una red de parcelas con criterios de representatividad de usos y tipologías de suelo ha permitido llevar a cabo la verificación de la estimación de la humedad media con la red permanente y la comprobación de la existencia de pautas similares de variabilidad. La red permanente de REMEDHUS ha permitido generar una base de datos diarios con una serie suficientemente larga (más de tres años) para poder demostrar la existencia de un inequívoco patrón de relación entre humedad media diaria del suelo y varianza. Se trata de una relación directa no lineal en la que se detectan dos regiones de comportamiento por encima y por debajo de un determinado contenido de agua en el suelo. Este resultado corrobora y profundiza en lo hallado en trabajos anteriores en la misma zona. Las diferencias obtenidas en ese patrón de comportamiento con las diferentes estrategias de muestreo, parecen estar relacionadas únicamente con el intervalo de muestreo temporal. El estudio de la persistencia temporal de los patrones de distribución espacial de humedad del suelo ha mostrado la existencia de una gran estabilidad temporal, que se altera únicamente cuando se producen episodios lluviosos después de prolongadas rachas secas. Bajo esas condiciones, los suelos parecen resaltar al máximo sus diferencias en relación con las específicas

propiedades hídricas de cada tipología.

Los estudios sobre variabilidad espacio/temporal de la humedad del suelo, la identificación de patrones de variabilidad o el análisis de la persistencia de dichos patrones, pueden ser de gran utilidad de cara a minimizar la incertidumbre inherente a la utilización de la modelización y la teledetección, hoy por hoy, las herramientas más potentes e ineludibles para la investigación hidrológica.

Agradecimientos. Los autores expresan su agradecimiento a Ana Cano, Pablo Méndez y Luciana A. Magalhães por su colaboración en el trabajo de campo, y al Ministerio de Ciencia y Tecnología (Proyectos ESP2006-00643 y ESP2007-65667-C04-04) y a la European Space Agency (AO 3230), sin cuya financiación no podría haberse realizado este trabajo de investigación.

REFERENCIAS

- Beven, K.J., 2001. *Rainfall-Runoff Modelling. The Primer*. J. Wiley & Sons, LTD, Chichester.
- Cosh, M.H., T.J. Jackson, S. Moran y R. Bindlish. 2008. Temporal persistence and stability of surface soil moisture in a semi-arid watershed. *Rem. Sens. of Env.* 112:304-313.
- Cosh, M.H., T.J. Jackson, P. Starks y G. Heathman. 2006. Temporal stability of surface soil moisture in the Little Washita River watershed and its applications in satellite soil moisture product validation. *J. of Hydrology*. 323:168-177.
- Famiglietti, J. S., J. W. Rudnicki y M. Rodell. 1998. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas. *J. of Hydrology*. 210:259-281.
- Gómez-Plaza, A., J. Alvarez-Rogel, J. Albaladejo y V. M. Castillo. 2000. Spatial patterns and temporal stability of soil moisture across a range of scales in a semi-arid environment. *Hydrological Proc.* 14:1261-1277.
- Guber, A.K., T.J. Gish, Y.A. Pachepsky, M.T. van Genuchten, C.S.T. Daughtry, T.J. Nicholson y R.E. Cady. 2008. Temporal stability in soil water content patterns across agricultural fields. *Catena*. 73:125-133.
- Hupet, F. y M. Vanclooster. 2002. Intraseasonal dynamics of soil moisture variability within a small agricultural maize cropped field. *J. of Hydrology*. 261:86-101.
- Kachanoski, R.G. y E. de Jong. 1988. Scale dependence and the temporal persistence of spatial patterns of soil water storage. *Water Resour. Res.* 24:85-91.
- Llorens, P., J. Latron y F. Gallart. 2003. Dinámica espacio-temporal de la humedad del suelo en un área de montaña mediterránea. Cuencas experimentales de Vallecebre (Alto Llobregat). En *Estudios en la Zona no Saturada del Suelo*. Vol. VI. (J. Álvarez-Benedí, P. Marinero Eds.) 71-76.
- Martínez-Fernández, J. y A. Ceballos. 2003. Temporal stability of soil moisture in a large-field experiment in Spain. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 67:1647-1656.
- Martínez-Fernández, J. y A. Ceballos. 2005. Mean soil moisture estimation using temporal stability analysis. *J. of Hydrology*. 312:28-38.
- Martínez Fernández, J., A. Ceballos Barbancho, S. Casado Ledesma y C. Morán Tejada. 2003. Estabilidad temporal de la humedad edáfica bajo diferentes condiciones ambientales mediterráneas y de uso del suelo. En *Estudios en la Zona no Saturada del Suelo*. Vol. VI. (J. Álvarez-Benedí, P. Marinero Eds.) 77-82.
- Mohanty, B. P. y T. H. Skaggs. 2001. Spatio-temporal evolution and time-stable characteristics of soil moisture within remote sensing footprints with varying soil, slope, and vegetation. *Adv. Water Resour.* 24:1051-1067.
- Nielsen, D.R., Biggar, J.W. y K.T. Erh. 1973. Spatial variability of field-measured soil-water properties. *Hilgardia*. 42:215-259.
- Qiu, Y., B. Fu, J. Wang y L. Chen. 2001. Spatial variability of soil moisture content and its relation to environmental indices in a semi-arid gully catchment of the Loess Plateau, China. *J. of Arid Environ.* 49:723-750.
- Robinson, M. y T.J. Dean 1993. Measurement of near surface soil water content using a capacitance probe. *Hydrological Proc.* 7:77-86.
- Schneider, K., J.A. Huisman, L. Breuer, Y. Zhao y H.G. Frede. 2008. Temporal stability of soil moisture in various semi-arid steppe ecosystems and its application in remote sensing. *J. of Hydrology*. 359:16-29.
- Vachaud, G., A. Passerat de Silans, P. Balabanis, y M. Vauclin. 1985. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 49:822-828.
- Van Wesenbeeck, I. J. y R. G. Kachanoski. 1988. Spatial and temporal distribution of soil water in the tilled layer under a corn crop. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 52:363-368.