

Monitorización de la zona no saturada en el entorno del Espacio Natural de Doñana

M. L. Prados⁽¹⁾, C. Guardiola-Albert⁽²⁾, K. Vanderlinden⁽³⁾, J. V. Giráldez⁽⁴⁾ y C. Mediavilla⁽¹⁾

(1) Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Área de investigación en procesos activos y calidad ambiental. Oficina de Proyectos de Sevilla. Plaza de España, Torre Norte. 41013 Sevilla
ml.prados@igme.es; c.mediovilla@igme.es

(2) Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Área de investigación en procesos activos y calidad ambiental. C/Ríos Rosas, nº 23, 28003, Madrid
c.guardiola@igme.es

(3) IFAPA. Centro Las Torres-Tomejil. Ctra. Sevilla-Cazalla, km 12.2, 41200 Alcalá del Río (Sevilla)
karl.vanderlinden@juntadeandalucia.es

(4) Departamento de Agronomía, Universidad de Córdoba e Instituto de Agricultura Sostenible, CSIC. Campus de Rabanales, Edificio da Vinci. Ctra. Madrid, km 396, 14071 Córdoba
ag1gicej@uco.es

RESUMEN

En el presente artículo se describe la metodología empleada para realizar el seguimiento del flujo de agua en la zona no saturada en cuatro puntos del Espacio Natural de Doñana dentro del marco de un estudio sobre la recarga del acuífero Almonte-Marismas. Así mismo se proporciona una descripción del uso del suelo y de las condiciones edáficas e hídricas en cada punto de medición. En estos suelos, de textura arenosa y drenaje rápido, con importantes oscilaciones en el contenido de humedad, el cual es en general bajo, el seguimiento del flujo de agua debe realizarse con alta frecuencia temporal. Para ello se han utilizado sensores de capacitancia de bajo coste, situándolos a distintas profundidades en los perfiles estudiados y hasta una profundidad que depende principalmente de la situación del nivel freático. Se propone un método de calibración de los sensores para incrementar la exactitud y precisión de las mediciones. Con este trabajo se ha podido comprobar el buen funcionamiento de los sensores de capacitancia para el seguimiento de la humedad del suelo, así como se han validado dos métodos de instalación de los sensores propuestos. Los datos demuestran que estos sensores permiten localizar con precisión el nivel freático dejando patente la necesidad de una calibración específica para cada suelo con el fin de incrementar la precisión de las mediciones.

Palabras clave: balance de agua, Doñana, recarga, sensores electromagnéticos, zona no saturada

Monitorization of the unsaturated zone on the sandy soils of Doñana National Park

ABSTRACT

Within the framework of a study into the recharge of the Almonte-Marismas aquifer, we describe the methods used to monitor water flux in the vadose zone at four sites within the Doñana National Park and its surroundings. We also provide a description of land use and soil and hydrological conditions at each measurement point. Very frequent observations are required to monitor efficiently the water flux in these well-drained, sandy soils, which undergo considerable oscillations in their usually low water content. To this end we have resorted to inexpensive capacitance probes, installed at different points along the soil profiles in question according mainly to the depth of the water table. We propose a calibration method to increase the accuracy and precision of the probe measurements. Our work has demonstrated that these sensors perform well in monitoring soil water content and also validates both the installation methods used. Data analysis proves that these sensors are very useful for locating the depth of the water table accurately and emphasises the need for specific calibration for each soil in order to obtain the most accurate moisture data.

Key words: Doñana, electromagnetic sensors, recharge, unsaturated zone, water balance

Introducción

Los ecosistemas y ecotonos presentes en Doñana dependen en gran parte del agua, por lo que pequeños cambios en las condiciones hídricas naturales pueden provocar desequilibrios de graves repercusiones en las características ecológicas y medioambientales de los mismos.

La distribución del agua que se infiltra en el suelo, la percolación, la absorción de las raíces de las plantas y la evaporación directa desde el suelo determinan la distribución, abundancia y permanencia de las especies vegetales. Los procesos físicos, químicos y biológicos que tengan lugar en la zona no saturada (ZNS) influyen por tanto en este frágil sistema que compone el Espacio Natural de Doñana.

En este trabajo se describe la metodología empleada para realizar el seguimiento del flujo de agua en la ZNS en varios puntos del Espacio Natural de Doñana dentro del marco de un estudio sobre la recarga del acuífero Almonte-Marismas. Para ello se propone la utilización de una red de sensores electromagnéticos que permita monitorizar en continuo el flujo de agua en la ZNS durante varios años.

Entre los múltiples sensores electromagnéticos que existen en el mercado se pueden citar los TDR (time domain reflectometry), los TDT (time domain transmission) o numerosos sensores de impedancia de alta frecuencia (Robinson et al., 2007). Los sensores de capacitancia ofrecen una excelente alternativa a los TDR por su bajo coste, entre otras razones tales como permitir una monitorización continua en múltiples puntos y cuya utilización se puede dar en muy distintos tipos de suelos (Mohamed et al., 1997; Seyfried y Murdock, 2004). En esta familia se encuentran los sensores utilizados para este estudio: las sondas de capacitancia de bajo coste ECH₂O EC-20 (Decagon Devices Inc., 2006). Estos sensores miden la permitividad eléctrica del suelo y la relacionan con el contenido de agua del mismo mediante una relación estándar del fabricante. Para aumentar la precisión de estas mediciones lo ideal es calibrar los sensores para los suelos en estudio, como concluyen Kizito et al. (2008), cuando se pone en marcha una amplia red de sensores de humedad en distintos suelos.

Este trabajo se realiza en el marco de la elaboración de una tesis doctoral que se encuentra en su fase inicial. Los objetivos son establecer si el uso de estos sensores es apropiado para evaluar el flujo de agua en profundidad, monitorizar la zona no saturada, estudiar el comportamiento de los mismos en estos suelos aplicando una calibración para incrementar la precisión y exactitud de las observaciones y evaluar y analizar los primeros datos obtenidos.

Sensores utilizados

El modelo de sensor ECH₂O EC-20 es el que se eligió para este estudio, por su fácil instalación y su bajo coste, además de su buena respuesta en suelos arenosos. Tiene un mantenimiento mínimo y la descarga de datos es muy sencilla si se usa un data-logger como el EM50 (Decagon Devices Inc., 2007). Además, como se observa en la Figura 1, el uso de estos sensores es bastante adecuado para este estudio, tanto por la superficie estudiada como por la frecuencia de datos requerida, ya que permite la obtención de datos en continuo.

Se trata de sensores electromagnéticos (de capa-

ciencia) que miden la permitividad dieléctrica del suelo y la relacionan con el contenido de agua mediante una relación empírica. Como la constante dieléctrica del agua es mucho mayor que la del aire o de los suelos minerales, la constante dieléctrica de un suelo permite una estimación de su humedad. Su principio básico de funcionamiento consiste en incorporar un medio dieléctrico (suelo) como parte del condensador dieléctrico del suelo (ver Figura 2).

La permitividad del suelo se determina midiendo el tiempo de carga desde un voltaje inicial, V_i , hasta un voltaje, V_f , con un voltaje aplicado, V , de un condensador que usa el suelo como dieléctrico. Si la resistencia R , V_f y V_i se mantienen constantes, el tiem-

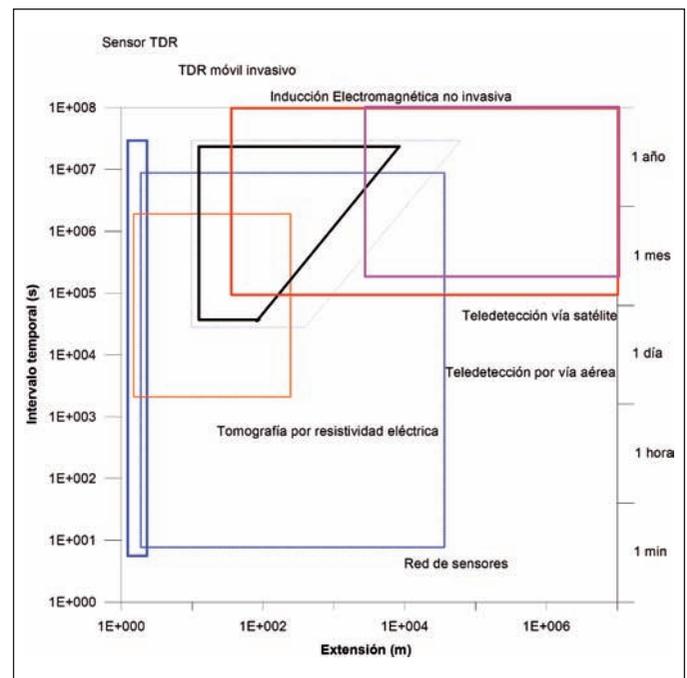


Figura 1. Diagrama conceptual que muestra la extensión estimada (m) de las medidas y su frecuencia temporal para diferentes métodos de medición de la humedad del suelo. La tecnología tradicional está restringida a procesos de medida con escala espacio-temporal correspondiente a los cuadros de líneas continuas. Las nuevas tecnologías y métodos (líneas discontinuas) enlazan las escalas de los sensores electromagnéticos y los métodos de teledetección. Estos métodos aumentan la capacidad de monitorizar los cambios rápidos de humedad del suelo a escala de pequeñas cuencas (Adaptado de Robinson et al., 2007)

Figure 1. Conceptual diagram showing the estimated extent (m) of the measurements and frequency of different soil moisture estimation methods. Current technology is restricted to measurement processes the space and time limits of which are confined by boxes with solid lines. The new technologies and methods (dashed lines) form a bridge between current sensors and remote sensing capabilities. They improve our ability to monitor rapid soil moisture change at small watershed basin scales (Adapted from Robinson et al., 2007)

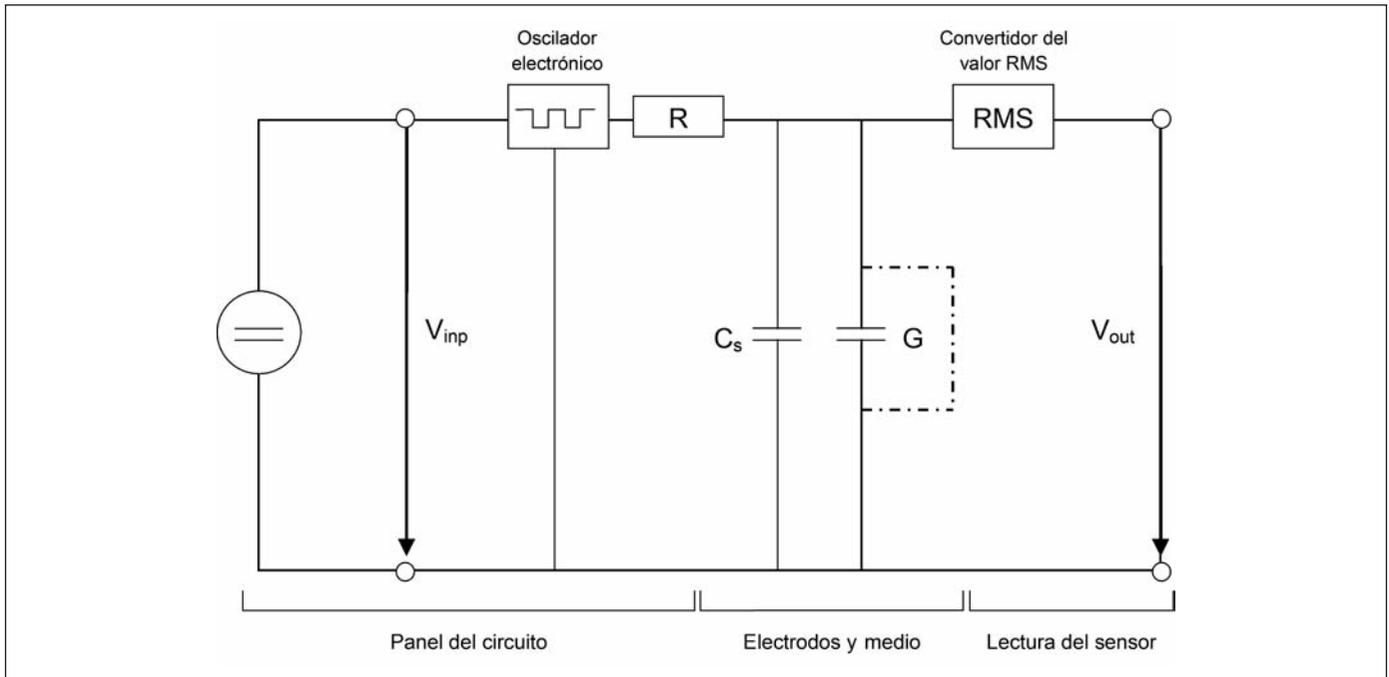


Figura 2. Circuito equivalente de un sensor de capacitancia, donde R es una resistencia, C es la capacitancia del medio, C_s es la capacitancia parásita, G es la energía perdida debido a la relajación y la conductividad iónica, RMS es el convertidor de corriente del sensor y V_{inp} y V_{out} son el voltaje suministrado y el leído por el sensor, respectivamente (Adaptado de Bogena et al., 2007)

Figure 2. Circuit equivalent to a capacitance sensor, where R is a resistor, C is the capacitance of the medium, C_s is the stray capacitance, G is the energy loss due to relaxation and ionic conductivity, RMS is the sensor current converter and V_{inp} and V_{out} are the supply and sensor reading voltage respectively (Adapted from Bogena et al., 2007)

po de carga del condensador, t, se relaciona con la capacitancia, C, según:

$$t = -RC \ln \left(\frac{V - V_f + V_i}{V_i - V_f} \right)$$

La capacitancia es una función de la permitividad dieléctrica, ε, del medio y de un factor geométrico, g, y puede ser calculada por la expresión

$$C = g\varepsilon$$

El factor g se asocia con la configuración del electrodo y la forma del campo electromagnético que penetra el medio. Asumiendo que el tiempo de carga del capacitor es una función lineal de la permitividad dieléctrica del medio que lo rodea, se puede calcular de la siguiente forma:

$$\frac{1}{\varepsilon} = \frac{1}{t} \left[-Rg \ln \frac{V - V_f + V_i}{V_1 - V_f} \right]$$

Un sensor de capacitancia típico determina V a elevada frecuencia (entre 10 y 100 MHz) para un pulso de longitud determinada t (Figura 3). La evolución de la curva de carga depende de la permitividad dieléctrica y por tanto del contenido de agua del suelo. En un suelo con elevado contenido en agua, el condensador se cargará más despacio y por tanto la curva de carga será más plana (Bogena et al., 2007).

Los sensores ECH₂O tienen muy bajas necesidades de energía y una elevada resolución, lo que permite realizar mediciones muy frecuentes durante periodos largos de tiempo. Además esta frecuencia se puede modificar, según las necesidades de medida. En este trabajo las mediciones se realizaron con una frecuencia de cada 15 minutos y se almacenaron en un registrador de datos EM-50 (Decagon Devices Inc., 2007).

Bandaranayake et al. (2007) utilizaron estos sensores en un suelo arenoso bien drenado y concluyeron que se ven afectados por la salinidad y las variaciones de temperatura (sensores superficiales) y que subestiman la humedad cuando el suelo no se encuentra bien compactado. En este estudio no se encuentran estos inconvenientes por tratarse de profundidades de más de 1 m, mientras en el trabajo mencionado sólo se estudia la profundidad radicular

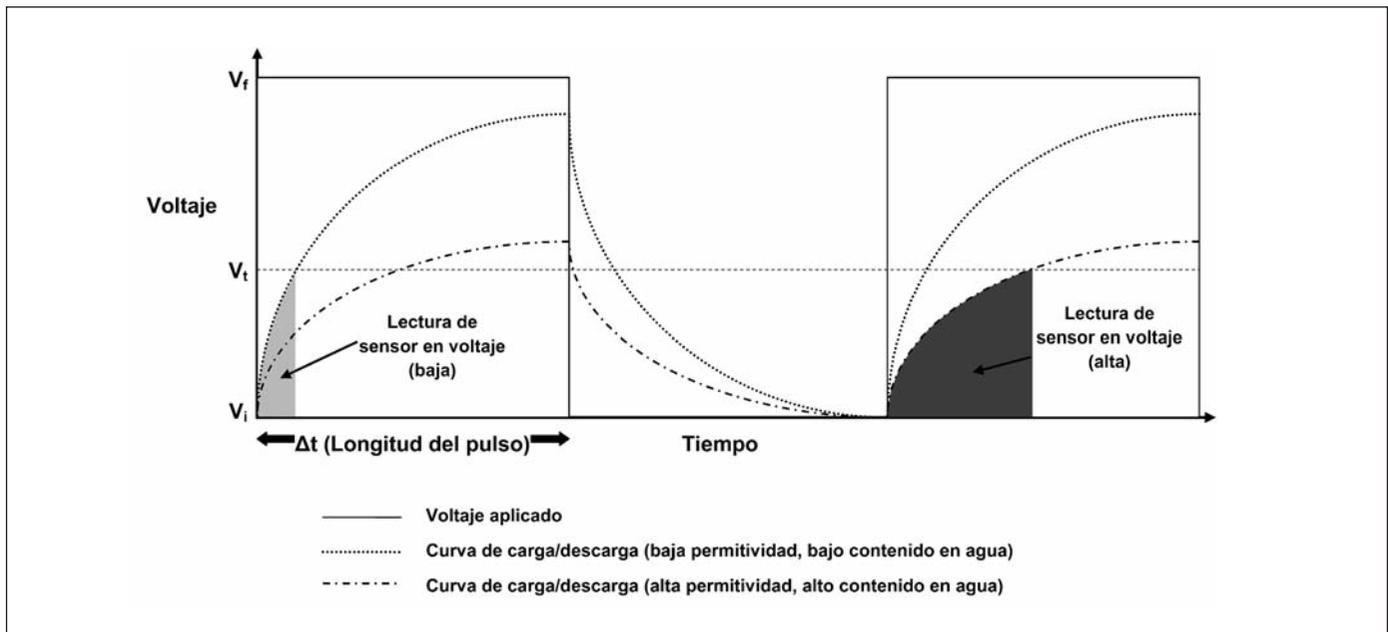


Figura 3. Curvas de carga y descarga de dos condensadores con alta y baja permitividad respectivamente, usando un pulso cuadrado repetitivo de duración Δt (Adaptado de Bogena et al., 2007), siendo V_i el voltaje inicial, V_f el voltaje final que se alcanza en Δt y V_s es el voltaje aplicado por el sensor

Figure 3. The charge and discharge curves of two capacitors with either high or low permittivity using a repetitive square pulse with a pulse length Δt (Adapted from Bogena et al., 2007), where V_i is the initial voltage, V_f is the final voltage reached in Δt and V_s is the voltage applied by the sensor

(hasta 90 cm). Otros autores han comparando su funcionamiento con otros sensores similares (Blonquist et al., 2005), mostrando debilidades como su gran sensibilidad a la conductividad eléctrica, que varía con las temperaturas diurnas, o una sobreestimación de la permitividad real cuando hay una conductividad eléctrica elevada. Sin embargo, los suelos de este estudio no son salinos y el hecho de estudiar la humedad en profundidad hace que se disminuya considerablemente la afección por variaciones bruscas de temperatura, por lo que estos sensores son una opción muy adecuada para los objetivos de este trabajo.

Puntos piloto instrumentados

En el inicio del estudio y con el fin de observar el buen funcionamiento de los sensores para nuestro estudio, por tratarse de un método novedoso, se seleccionaron cuatro puntos iniciales en los que fueron instaladas las sondas de medición de humedad (Tabla 1).

En primer lugar se equiparon con los sensores de humedad los puntos de El Abalarío y El Acebuche (Figura 4). La zona de El Abalarío se encuentra en la

zona occidental del Espacio Natural de Doñana. En este punto la vegetación característica es el pinar con monte blanco (o matorral xerofítico), compuesto por diversas especies de matorral bajo tales como *Cistus libanotis* (jara o jaguarzo romero), *Rosmarinus officinalis* (romero) y *Halimium conmutatum* (jaguarzo). El nivel freático en esta zona estaba a más de 2 m de profundidad en el momento de la instalación de los sensores, aunque cuando hay precipitaciones puede llegar a ascender hasta la superficie. La textura es arenosa y el perfil es homogéneo, de color blanquecino en toda la profundidad explorada.

En el punto denominado El Acebuche, próximo al límite occidental del Parque Nacional de Doñana, encontramos una vegetación mixta de monte blanco y monte negro (o matorral higrofitico) bajo pinar. Las especies arbustivas que componen el monte negro son principalmente *Erica scoparia* (brezo blanquillo), *Calluna vulgaris* (brecilla), *Ulex minor* (tojo) y *Erica ciliaris* (brezo). En este punto el nivel freático se encontraba a más de un metro de profundidad en el momento de la instalación. El perfil es arenoso, de color ocre y bastante homogéneo.

Meses más tarde, en la zona próxima al Palacio de Marismillas (ver Figura 4), se instrumentaron dos puntos siguiendo un transecto, a distintas cotas y, por

tanto, con el nivel freático a distintas profundidades. Ambos puntos tienen características edafológicas similares, situándose en plena flecha litoral (arenas eólicas) y encontrándose en profundidad algunas discontinuidades con restos de conchas, probablemente restos de una antigua playa.

El primero de estos puntos (Marismillas 1) está situado en una cota media del transecto seleccionado, al inicio del cortafuegos número 7 del Parque Nacional, que se encuentra en esta ubicación. En este punto las especies vegetales presentes son fundamentalmente pinos (*Pinus pinea*). El nivel freático se encontró a unos 3 m de profundidad. A una profundidad entre los 2 y los 2,5 m existe un horizonte con abundantes restos de conchas marinas.

El segundo de estos puntos (Marismillas 2) se encuentra en el límite del cortafuegos de una masa de pinos. Al ser un punto de menor cota, el nivel freático se encuentra a tan solo 1,5 m de profundidad y las especies vegetales presentes son pinos y labiér-

nagos (*Phillyrea angustifolia*). Además este punto está influenciado por el suelo desnudo del cortafuegos. Entre 0,5 m y 0,7 m de profundidad se encontró un horizonte con abundantes restos de conchas.

Instalación de los sensores

Los sensores fueron instalados en distintas profundidades del perfil seleccionado para su estudio y hasta una profundidad máxima dependiente, principalmente, del nivel freático. Para instalar los sensores en profundidad se utilizaron dos métodos: zanja y barrenas. El primer método se utilizó en El Abalarío, El Acebuche y Marismillas 2 y consiste en practicar una zanja en el suelo y en un lateral de la misma insertar los sensores de forma horizontal, paralelos a la superficie del suelo. Esto permite que se eviten errores por acumulación de humedad en la superficie de la sonda. Además, con este método se insertan los sen-

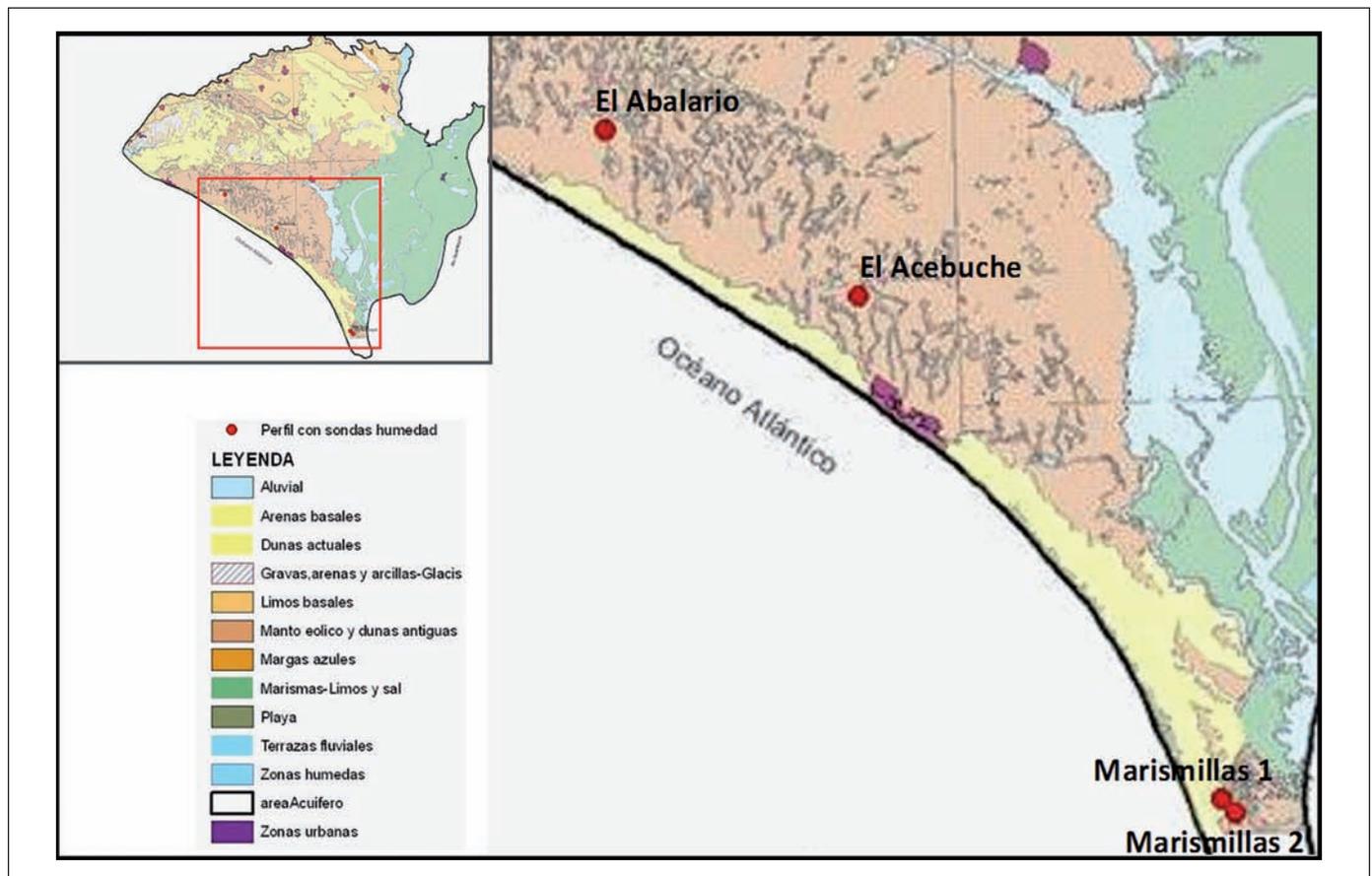


Figura 4. Situación de los puntos instrumentados
Figure 4. Site of the study points

Toponimia	X_29	Y_29	Profundidad (m)	Tipo Sonda	Nº unidades	Tipo Datalogger
El Abalarío	705321	4109711	2,00	EC-20	10	EM-50 Decagon
El Acebuche	716291	4102657	1,00	EC-20	5	EM-50 Decagon
Inicio Corta Fuegos (Marismillas-1)	732381	4080629	1,50	EC-20	5	EM-50 Decagon
Final Corta Fuegos (Marismillas-2)	730790	4109932	3,70	EC-20	9	EM-50 Decagon

Tabla 1. Coordenadas y equipamiento instalado en los puntos en estudio
 Table 1. UTM co-ordinates of the study points and the equipment installed

sores en una zona del suelo no alterada. El método de instalación de barrenas, se utilizó en el punto denominado Marismillas 1, ya que en esta situación el nivel freático se encontraba a más de 3 m de profundidad, siendo difícil la excavación de la zanja. Consiste en realizar perforaciones verticales mediante una barrena, penetrando hasta la profundidad deseada. Posteriormente mediante una barra se inserta el sensor en posición vertical dentro de esa perforación, comprobando mediante el ECH₂O-check (Decagon Devices Inc., 2008) que el sensor funciona correctamente antes de cubrirlo definitivamente. En este estudio se analiza si se observan diferencias entre los datos aportados por los sensores instalados con los dos métodos.

A cada data-logger EM-50 (Decagon Devices Inc., 2007), se conectaron cinco sensores. La frecuencia de medida es una toma de datos cada 15 minutos. La descarga de los datos puede tener lugar cada tres o cuatro meses, dadas la gran capacidad de almacenamiento de datos y las pocas necesidades energéticas de estos aparatos. Las baterías pueden durar hasta un año, si bien es conveniente una mayor frecuencia en la sustitución para evitar imprecisiones en la toma de datos.

Calibración de los sensores

Los sensores con los que se ha trabajado vienen calibrados por el fabricante, relacionando el valor de la permitividad dieléctrica del suelo que miden los sensores con un contenido de humedad que tendría un suelo medio. Sin embargo, esta calibración general no es aplicable para todos los sensores en todos los tipos de suelo. Por ejemplo, la calibración de fábrica del EC-20 no es válida para suelos con elevados contenidos en arena o en sales. Es por ello que, para su utilización adecuada, se recomienda la realización de

una calibración específica para cada suelo en estudio.

Para ello se tomaron muestras de suelo de distintas profundidades en cada uno de los puntos en estudio. El suelo se introdujo en cilindros perforados, de 25 cm de altura y 10 cm de diámetro, envueltos con una tela porosa y se insertaron los sensores de humedad en ellos, así como un sensor de temperatura. Una vez saturadas las muestras, se situaron sobre unas balanzas dispuestas en el interior de una estufa. Se procedió al secado de las muestras con variaciones de temperaturas entre 20 y 40 °C, registrando en continuo tanto la masa determinada por las balanzas como las mediciones de los sensores.

Los ensayos preliminares de calibración se realizaron en muestras de suelo de varias profundidades de cada punto estudiado. Los sensores ECH₂O-20 (EC-20) se introdujeron en la muestra en estufa, junto con dos sensores de temperatura, uno en el interior y otro en el exterior de la muestra. Los sensores registraron en continuo los datos de humedad volumétrica (con la calibración del fabricante) y la temperatura, variando la temperatura de la estufa periódicamente entre los 20 y 40 °C. Estos ensayos se han realizado con varias muestras de cada uno de los puntos, aunque a modo de ejemplo se analizará a continuación uno de los ensayos.

En la Figura 5a se presentan datos medios de uno de los ensayos de calibración realizados (AC1, AC2 y AC3, muestras de El Acebuche correspondientes a 20, 40 y 60 cm de profundidad, respectivamente).

Se observa que los sensores EC-20 con la calibración del fabricante subestiman los contenidos de humedad. Si nos fijamos en las variaciones de temperatura, al contrario de lo que indican otros autores (Blonquist et al., 2005; Parson et al., 2007), la lectura de los sensores no se ve afectada por las variaciones de la misma, puesto que los cambios en la pendiente de la curva responden a cambios en el contenido de humedad observado en el ensayo, estimado a partir

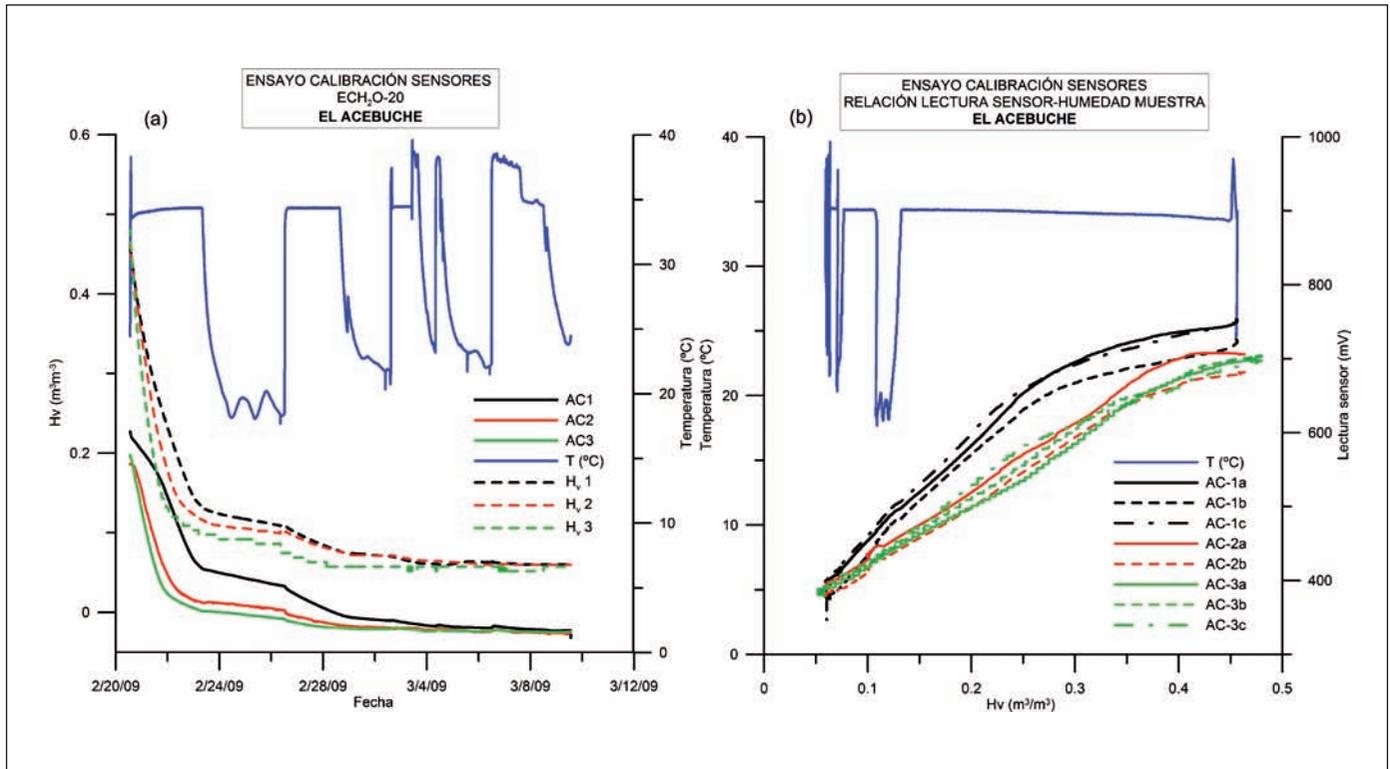


Figura 5. Ensayo de calibración de sensores para muestras de El Acebuche. (a) Registro de datos medios de humedad volumétrica (H_v) obtenidos en estufa y valores medidos por los sensores (AC) para cada profundidad estudiada: 0,1 m (H_v , 1 y AC1), 0,2 m (H_v , 2 y AC2) y 0,3 m (H_v , 3 y AC3). (b) Relación de la medida de los sensores (AC) y la humedad volumétrica de la muestra (H_v), en las repeticiones (a, b y c) que se realizaron para cada profundidad estudiada. Fechas en formato mes/día/año

Figure 5. Sensor calibration test with soil samples from El Acebuche. (a) Mean volumetric water content (H_v) obtained in drying oven and sensor data for each depth studied: 0,1 m (H_v , 1 and AC1), 0,2 m (H_v , 2 and AC2) and 0,3 m (H_v , 3 and AC3); (b) Sensor output/volumetric water content relationship for the three repetitions (a, b and c) at each depth studied. Dates in month/day/year format

		EM	EMA	REMC	EMR	CE
Lectura media fabricante	AC1	-0,0843	0,0843	0,0843	0,9403	-0,2382
	AC2	-0,15015	0,15015	0,1055	1,1064	-1,1629
	AC3	-0,0908	0,0908	0,0946	1,2006	-1,2079
Valores calibrados medios	AC1	0,0069	0,0121	0,0182	0,1000	0,9460
	AC2	-0,0135	0,0136	0,0267	0,0899	0,8611
	AC3	-0,0040	0,0109	0,0218	0,1028	0,8829

Tabla 2. Valores obtenidos en el estudio de errores realizado en las muestras de suelo de El Acebuche para la lectura media de los sensores (tres primeras filas de la tabla) y para los valores calibrados medios (tres últimas filas de la tabla) en las tres profundidades estudiadas: 0,1 m (AC1), 0,2 m (AC2) y 0,3 m (AC3). EM: error medio, EMA: error medio absoluto, REMC: raíz del error medio cuadrático, EMR: error absoluto medio relativo y CE: coeficiente de eficiencia

Table 2. Values obtained in the error study conducted with the El Acebuche soil samples for the mean sensor measurements (first three rows in the table) and for the mean calibrated values (last three rows in the table) for the three depths studied: 0.1 m (AC1), 0.2 m (AC2) and 0.3 m (AC3). EM: mean error; EMA: mean absolute error; REMC: root mean squared error; EMR: mean relative absolute error; CE: efficiency coefficient

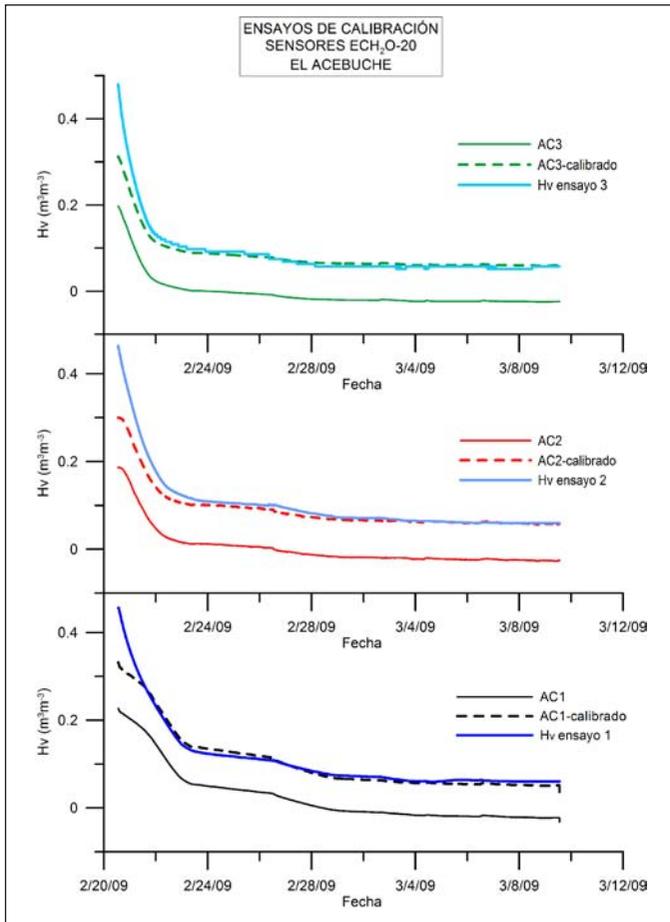


Figura 6. Resultados de la calibración de los sensores en muestras de suelo de El Acebuche en el ensayo explicado en la Figura 5. Se compara la humedad volumétrica medida (H_v), los valores medidos por los sensores con la calibración del fabricante (AC) y los valores calibrados (AC-calibrado) para cada profundidad estudiada: 0,1 m (ensayo 1), 0,2 m (ensayo 2) y 0,3 m (ensayo 3). Fechas en formato mes/día/año

Figure 6. Sensor calibration results for the same soil samples from El Acebuche as in Figure 5. Volumetric water content (H_v), sensor measurements (AC) and calibrated values (AC-calibrated) are compared for each depth studied: 0.1 m (assay 1), 0.2 m (assay 2) and 0.3 m (assay 3). Dates in month/day/year format

de la humedad gravimétrica obtenida en báscula y tras secado de la muestra a 105°C.

La Figura 5b corresponde al mismo ensayo anteriormente comentado, representando la lectura en milivoltios de los sensores (sin calibración) con respecto al contenido de humedad volumétrica observada en la muestra, con el fin de encontrar alguna relación lineal entre ellas para poder utilizarla como calibración. La relación para el EC-20 sería una curva que se podría dividir en dos regiones, seca y húmeda,

para las que se podría ajustar una recta. Partiendo de los datos de retención de humedad obtenidos en laboratorio se puede considerar que a partir del 30% de humedad volumétrica el suelo se encuentra saturado (porosidad de las muestras en torno al 40-45%), por lo que la calibración de la región seca de la curva sería suficiente para los fines de este estudio. Bandaranayake et al. (2007) utilizan para estos ajustes las medidas por debajo del 20% de humedad volumétrica. Para este estudio, de acuerdo con lo comentado anteriormente, se ha realizado una calibración sencilla, ajustando los valores de la región seca (datos correspondientes a una humedad inferior al 30%) a una recta. La calibración obtenida es la que se puede observar en la Figura 6, en la que se comprueba que tras aplicar esta calibración la humedad estimada en el ensayo se corresponde de forma más precisa a la humedad observada en las muestras.

Para estudiar la idoneidad de la medida de los sensores, antes y después del ajuste, se ha realizado un estudio de errores (Tabla 2). Las variables estudiadas son el error medio (EM), el error absoluto medio (EMA), la raíz del error medio cuadrático (REMC), el error medio relativo (EMR) y el coeficiente de eficiencia (CE), donde x_i^* es el valor obtenido de la curva de calibración del sensor que propone el fabricante, x_i el valor obtenido por gravimetría y \bar{x} es el valor medio obtenido por gravimetría. El estudio de errores se ha calculado a partir de la media de las tres repeticiones realizadas para cada profundidad estudiada (AC1, AC2 y AC3).

$$EM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^* - x_i) \quad EMA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i^* - x_i|$$

$$REMC = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^* - x_i)^2} \quad EMR = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|x_i^* - x_i|}{x_i}$$

$$CE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |x_i^* - x_i|}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})}$$

Cabe destacar que en los valores calibrados el error medio es prácticamente cero, y que el error medio relativo está en torno al 10%. Esto se debe a que, para valores de humedad elevada, estos sensores pierden sensibilidad (Bogena et al., 2007), por lo que es más difícil el ajuste. De cualquier modo los valores calibrados muestran menor error y la eficiencia del ajuste aumenta hasta aproximadamente el 90%.

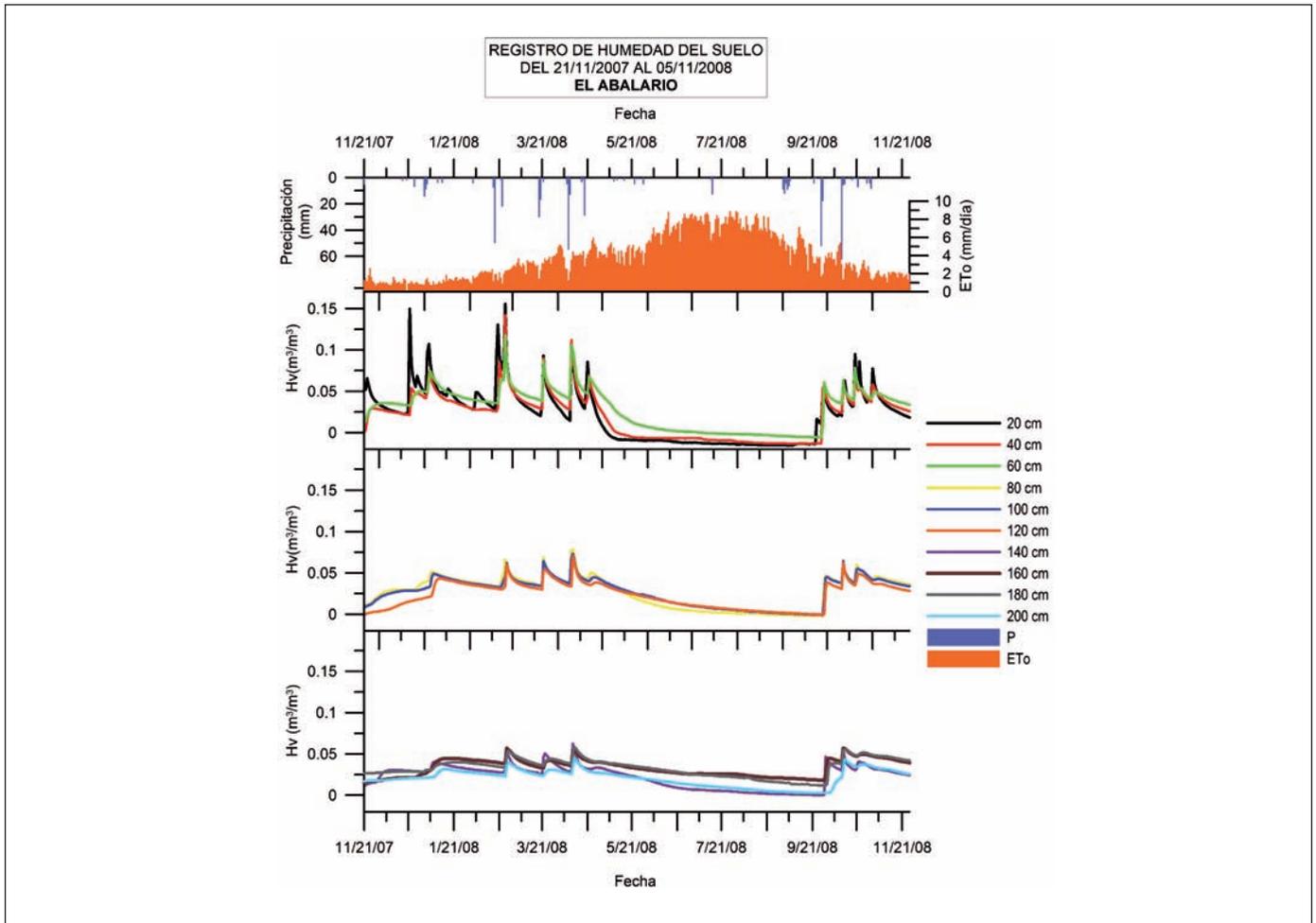


Figura 7. Registros de precipitación, evapotranspiración de referencia (ET_0) y humedad volumétrica calibrada a distintas profundidades (H_v) en El Abalarío (ver explicación en texto). Fechas en formato mes/día/año
 Figure 7. Time series of rainfall, reference evapotranspiration (ET_0) and calibrated volumetric soil water content (H_v) at El Abalarío (see explanation in text). Dates in month/day/year format

Resultados y discusión

Los primeros datos obtenidos de los registros de los sensores en los distintos puntos aportan una relevante información del flujo de agua en la zona no saturada, como se puede observar en la Figuras 7 y 8, en las que los datos se han relacionado con la precipitación y la evapotranspiración de estaciones meteorológicas cercanas.

Tanto en el punto de El Abalarío (Figura 7) como en el de El Acebuche (Figura 8) se aprecia la relación directa entre los ascensos de la humedad del suelo y la precipitación. En los puntos más superficiales se observa una respuesta muy rápida a las precipitaciones, aunque también se observa que la elevada humedad que alcanzan disminuye también con una

gran rapidez, drenando hacia los horizontes subyacentes.

Por ello, como es de esperar, en los horizontes más profundos se observa que la humedad aumenta con un cierto retardo respecto a la fecha de precipitaciones, además de aumentar en menor medida el contenido de humedad. En ninguno de estos dos primeros puntos fue detectado el nivel freático por encontrarse éste a mayor profundidad. Cabe destacar que estos datos son los obtenidos tras realizar la calibración específica para cada suelo estudiado. Sin embargo los datos brutos obtenidos por los sensores con la calibración del fabricante también aportan una información útil del flujo de agua en el perfil estudiado, ya que permiten el cálculo de las variaciones de humedad.

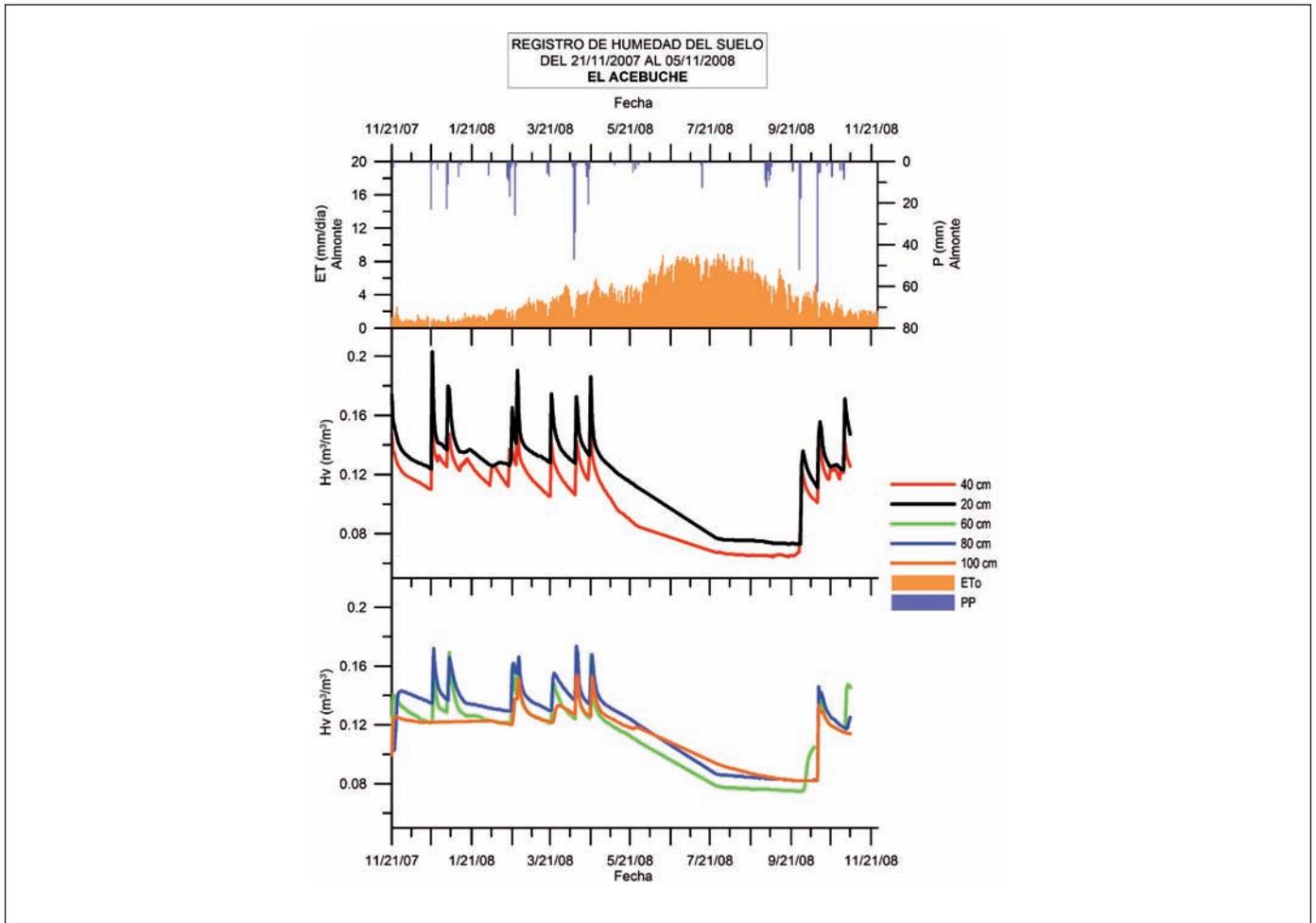


Figura 8. Registros de precipitación, evapotranspiración de referencia (ET_0) y humedad volumétrica calibrada a distintas profundidades (H_v) en El Acebuche (ver explicación en texto). Fechas en formato mes/día/año
 Figure 8. Time series of rainfall, reference evapotranspiration (ET_0) and calibrated volumetric soil water content (H_v) at El Acebuche (see explanation in text). Dates in month/day/year format

En los dos puntos del entorno del Palacio de Marismillas sí se alcanzó la profundidad del nivel freático, como se refleja claramente en los registros de los sensores (Figuras 9 y 10). En estos puntos queda patente la necesidad de realizar una calibración para obtener datos precisos de contenidos de humedad, puesto que la mayoría de datos aportados por los sensores se encuentran por debajo de cero, lo que no tiene sentido físico. En las Figuras 9 y 10 se pueden ver los datos obtenidos, tras haberles aplicado la calibración.

Según el estudio de los datos registrados en estos dos puntos, a diferencia de los anteriores, los contenidos de humedad no siguen la pauta de los valores esperados en la profundidad del perfil. En efecto, en el punto 1 de Marismillas (Figura 9) los sensores situados a 20 y 60 cm registran aumentos de la hume-

dad del suelo en el momento en el que se producen precipitaciones. Al profundizar en el perfil, el sensor situado a 145 cm no registra cambios significativos al producirse precipitaciones. El sensor subyacente, situado a 200 cm, registra un ascenso inesperado de la humedad, produciéndose con retraso respecto a las fechas en que se registraron eventos de lluvia (8 y 9 de abril de 2008), siendo este ascenso el 16 y 17 del mismo mes, con una semana de retraso. En el sensor que le sigue en profundidad, el situado a 235 cm, el comportamiento de la curva de humedad es similar al sensor a 145 cm, sin influencia importante de los eventos de lluvia. Esto hace pensar que a 200 cm de profundidad hay una zona de mayor compactación o de flujo preferencial de agua, por donde podría circular de forma horizontal la descarga proveniente de una duna próxima, aunque también este ascenso de

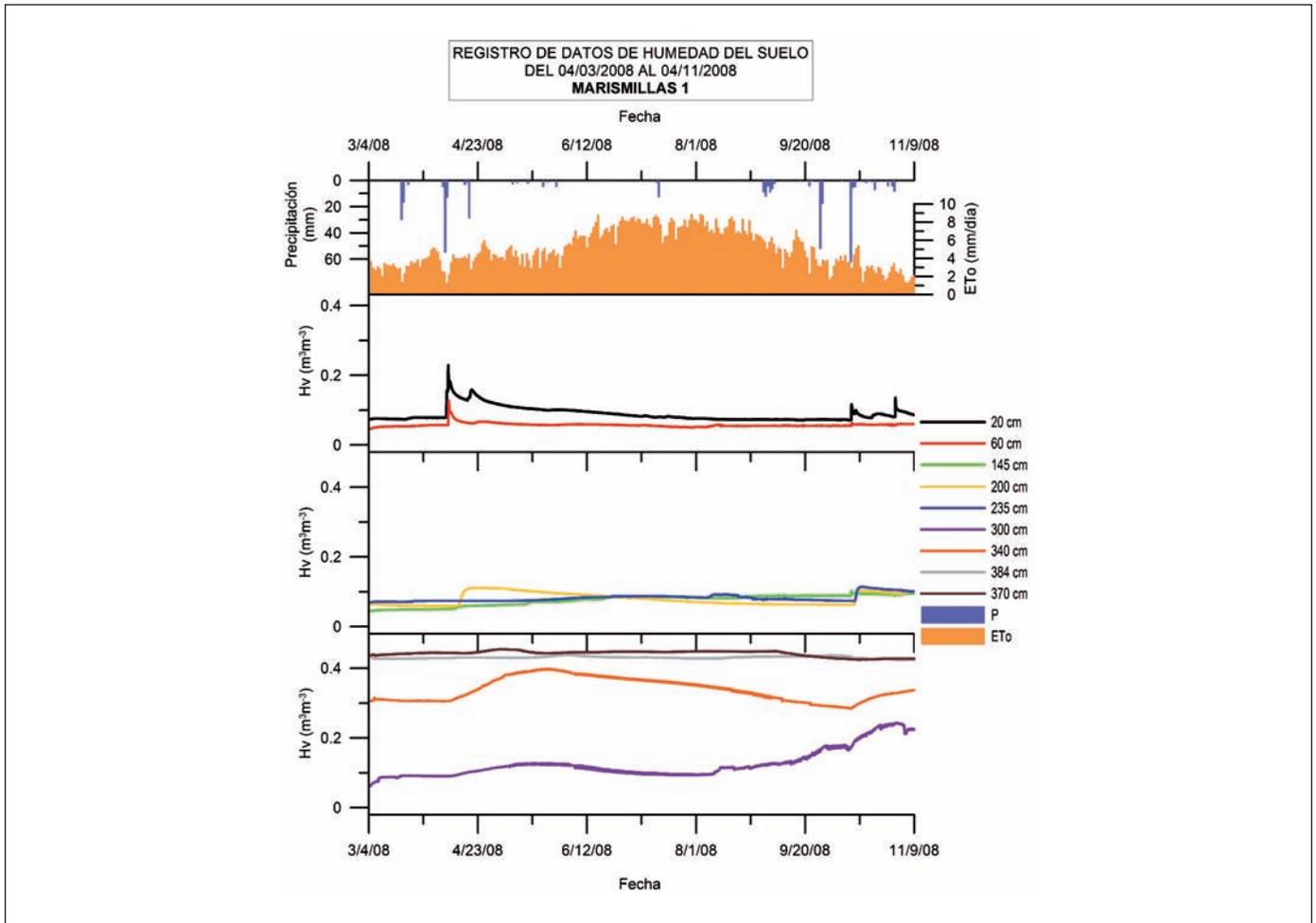


Figura 9. Registros de precipitación, evapotranspiración de referencia (ET_0) y humedad volumétrica calibrada de distintas profundidades (H_v) en Marismillas 1 (ver explicación en texto). Fechas en formato mes/día/año
 Figure 9. Time series of rainfall, reference evapotranspiration (ET_0) and calibrated volumetric soil water content (H_v) at Marismillas 1 (see explanation in text). Dates in month/day/year format

la humedad podría deberse a un efecto local de la barrera capilar. En los sensores situados a mayor profundidad se observa la influencia del nivel freático, por los elevados contenidos en humedad. Por ello se puede afirmar que la zona de oscilación de la franja capilar se encuentra en torno a los 300-350 cm de profundidad, mientras que a partir de esa profundidad el suelo se encuentra saturado de forma constante.

Resulta interesante estudiar el comportamiento de la humedad del suelo en la zona de oscilación de la franja capilar. En la época de estiaje el sensor situado a 300 cm comienza a registrar un aumento en la humedad del suelo, coincidiendo con una disminución en proporción similar en el sensor inmediatamente inferior. Esto podría deberse a la anteriormente citada descarga lateral proveniente de la duna, aunque es necesario continuar con la investigación

en este aspecto, teniendo en cuenta las posibles influencias de la evaporación en un acuífero somero como es el caso (y de todo el sistema suelo-planta-atmósfera), lo que supondría un buen aporte al conocimiento del funcionamiento de la ZNS. Al comenzar la época de lluvias, tanto en estos dos sensores como en los sensores situados a menor profundidad, se registra el comportamiento esperado, aumentando la humedad en toda la profundidad del perfil al tener lugar los eventos de lluvia.

Un comportamiento similar se puede observar en las curvas registradas en el punto 2 del entorno del Palacio de Marismillas, de cota más baja (Figura 10). En el sensor más superficial se observa una influencia directa de las precipitaciones, con rápidas oscilaciones en el ascenso y descenso de los contenidos de humedad. En los sensores situados a 60 y 110 cm se

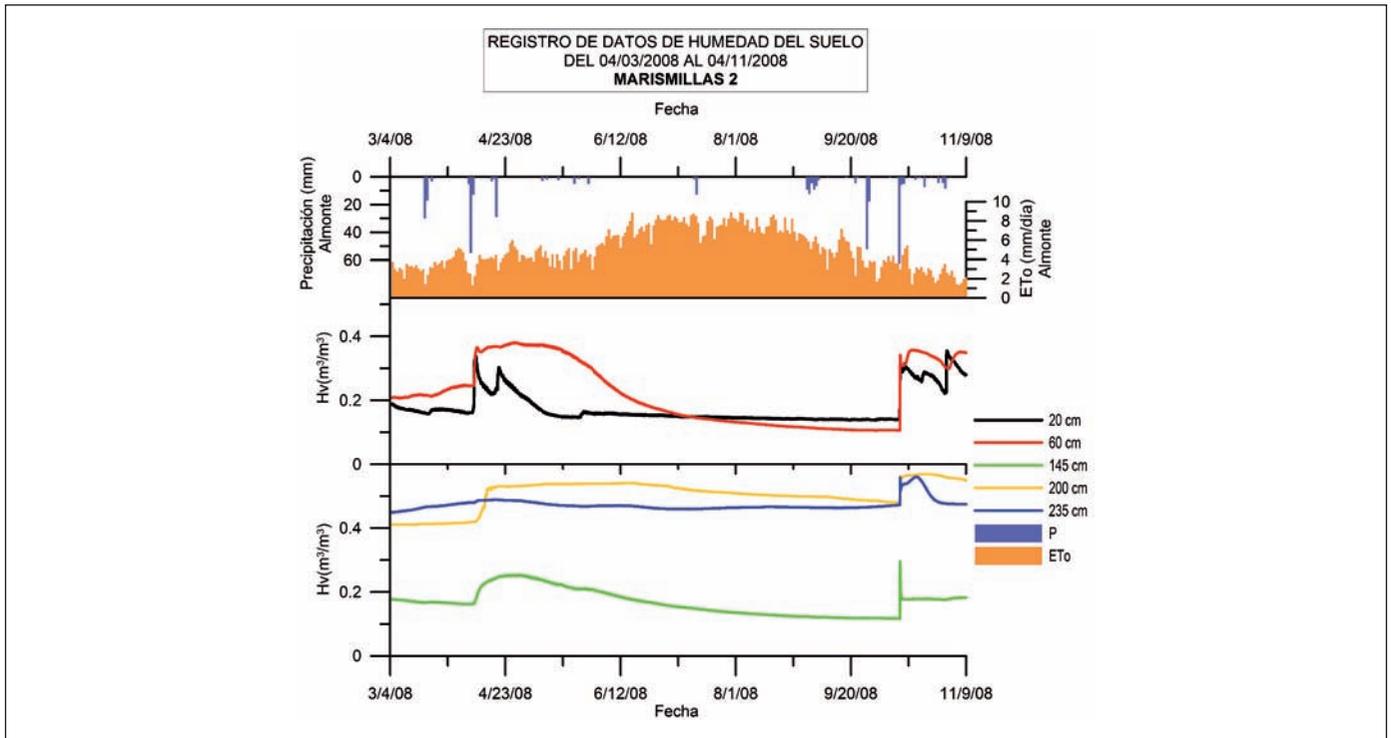


Figura 10. Registros de precipitación, evapotranspiración de referencia (ET_0) y humedad volumétrica calibrada de distintas profundidades (H_v) en Marismillas 2 (ver explicación en texto). Fechas en formato mes/día/año
 Figure 10. Time series of rainfall, reference evapotranspiration (ET_0) and calibrated volumetric soil water content (H_v) at Marismillas 2 (see explanation in text). Dates in month/day/year format

observa un elevado aumento en la humedad también con cierto retraso respecto a la fecha de precipitaciones, lo que podría indicar que en este punto también tiene lugar ese flujo horizontal preferente en profundidad. Se observa que la zona de oscilación de la franja capilar en este caso se encuentra entre 140 y 150 cm de profundidad.

El hecho de que en ambos puntos, en los que se han utilizado diferentes métodos de instalación de los sensores, se observe un comportamiento similar en el suelo parece dar por válidos ambos métodos de instalación.

Conclusiones y continuidad del trabajo

Queda patente en este estudio previo del funcionamiento de los sensores que es necesario establecer una relación de calibración para los suelos estudiados con el fin de cuantificar con precisión los contenidos de humedad. Sin embargo, para realizar un análisis cualitativo y estudiar las variaciones que se producen en los contenidos de humedad, se puede

valorar muy positivamente la información que aportan estos sensores, incluso sin calibrar, ofreciendo además la gran ventaja de tener un coste muy económico y de proporcionar un registro de datos en continuo con una elevada resolución temporal.

Al estudiar las relaciones de calibración de estos sensores se encuentran complicaciones cuando se trata de elevados contenidos de humedad. En este caso los sensores se vuelven más imprecisos. Sin embargo, como se ha visto en los datos registrados en campo, los suelos de la zona en estudio rara vez registran contenidos de humedad superiores a $0,3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (este valor se corresponde aproximadamente con la porosidad total), por lo que estas imprecisiones no afectarán en gran medida al estudio del flujo de agua, que ocurre principalmente en condiciones subsaturadas en estos suelos.

La instalación de estos sensores a lo largo de la ZNS permite situar con gran precisión el nivel freático, así como sus oscilaciones, ya que al tratarse de arenas puede asumirse equivalente al nivel de saturación. Es necesario disponer de una serie de datos mayor para sacar conclusiones de los distintos facto-

res que pueden tener influencia en dichas oscilaciones, aunque se apunta alguna idea sobre el flujo lateral procedente de cotas más elevadas. Así mismo, se observa que los datos aportados por los sensores instalados mediante el método de barrenas tienen características similares al resto, por lo que el funcionamiento se da por correcto, a la espera de continuar obteniendo más datos para el análisis.

Este estudio preliminar ha permitido comprobar el buen funcionamiento de los sensores, por lo que posteriormente se han equipado otros puntos en el Espacio Natural Doñana para tener una red de monitorización en diferentes zonas del acuífero Almonte-Marismas. Los datos obtenidos permitirán modelar el flujo de la ZNS de esta unidad hidrogeológica para así estimar la recarga del acuífero.

Referencias

- Bandaranayake, W.M., Parsons, L.R., Borhan, M.S. y Holeton, J.D. 2007. Performance of a capacitance-type soil water probe in a well-drained sandy soil. *Soil Science Society of America Journal*, 71, 993-1002.
- Bogena, H.R., Huisman, J.A., Oberdörster, C. y Vereecken, H. 2007. Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications. *Journal of Hydrology*, 344, 32-42.
- Decagon Devices, Inc. 2006. *ECH₂O Soil Moisture Sensor. Operator's Manual, for models EC-20, EC-10 y EC-5.* Version 5. 2365 NE Hopkins Court. Pullman WA 99163 USA.
- Decagon Devices, Inc. 2007. *EM50, Data Collection System. User's Manual.* Versión 4. 2365 NE Hopkins Court. Pullman WA 99163 USA.
- Decagon Devices, Inc. 2008. *5TE. Water Content, EC and Temperature Sensor. Operator's Manual.* Version 5. 2365 NE Hopkins Court. Pullman WA 99163 USA.
- Blonquist, J.M. Jr., Robinson, D.A. y Rasmussen, V.P. 2005. Standardizing characterization of Electromagnetic Water Content Sensors: Part 1. Methodology. *Vadose Zone Journal*, 4, 1048-1058.
- Kizito, F., Campbell, C.S., Campbell, G.S., Cobos, D.R., Teare, B.L., Carter, B. y Hopmans, J.W. 2008. Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor. *Journal of Hydrology*, 352, 367-378.
- Mohamed, S.O., Bertuzzi, P., Bruand, A., Raison, L., y Bruckler, L. 1997. Field evaluation and error analysis of soil water content measurement using the capacitance probe method. *Soil Science Society of America Journal*, 61, 399-408.
- Robinson, D.A., Campbell, C., Hopmans, J.W., Hornblukle, B., Jones, J.B., Knight, R., Ogden, F., Selker, J. y Wendroth, O. 2007. A review vision for soil moisture measurements for ecological and hydrological watershed scale observations. *Vadose Zone Journal*, 7, 358-389.
- Seyfried, M.S. y Murdock, M.D. 2004. Measurement of soil water content with a 50MHz soil dielectric sensor. *Soil Science Society of America Journal*, 68, 394-403.

Recibido: abril 2009
Revisado: junio 2009
Aceptado: marzo 2010
Publicado: julio 2010

