

## UTILIDAD DE LAS SONDAS DE CAPACITANCIA EN EL ESTUDIO DE LOS PROCESOS DE LIXIVIACIÓN DE NITRATOS EN AGROSISTEMAS

M. ARAUZO SÁNCHEZ, J. A. DÍEZ LÓPEZ, P. J. HERNÁIZ

Departamento de Contaminación y Química Ambiental, Centro de Ciencias Medioambientales-CSIC, Serrano 115 dpdo., 28006 Madrid. mercedes@ccma.csic.es

**Abstract.** In order to minimise the amount of nutrients leaching into water bodies, some issues must be addressed: precise fertilizer level, proper application and optimisation of irrigation systems. This work provides a methodology to calculate soil water balances, based on continuous monitoring of the soil water content, using capacitance probes. Drainage values and contents of nitrate in the soil water (extracted by a ceramic candle) were used to estimate nitrate leaching. Drainage of 201 mm and nitrate leaching of 60 Kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ha<sup>-1</sup> were obtained during the maize crop (April-October of 2002), whereas drainage of 41 mm and nitrate leaching of 15 Kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ha<sup>-1</sup> were estimated during the fallow period (November-April of 2003). The highest values of drainage and nitrate leaching were obtained during the watering season. This methodology provides an answer to the need for developing more accurate methods to study aquifer pollution in agricultural areas.

**Key words:** capacitance probes, drainage, evapotranspiration, nitrate leaching

**Resumen.** La adecuada dosificación de los fertilizantes y la optimización de los sistemas de riego son aspectos que deben ser mejorados a fin de minimizar los procesos de lixiviación de nutrientes hacia las reservas de agua. En este trabajo se presenta un procedimiento para el cálculo de balances hídricos en el suelo basado en la monitorización, en continuo, de su contenido en agua mediante sondas de capacitancia. Los valores de drenaje obtenidos, combinados con la estimación de las concentraciones de nitrato en la disolución del suelo (extracción mediante cápsulas porosas de succión), permiten la cuantificación del nitrato lixiviado. Aplicando esta metodología, se estimó un drenaje de 201 mm y una lixiviación de nitrato de 60 Kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ha<sup>-1</sup> durante el periodo de cultivo de maíz (abril-octubre de 2002), mientras que en la fase de intercultivo (noviembre-abril de 2003) el drenaje fue de 41 mm y la lixiviación de 15 Kg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ha<sup>-1</sup>. Los valores máximos de drenaje y lixiviación se dieron durante el periodo de riego. La metodología propuesta supone una respuesta a la necesidad de desarrollar técnicas de mayor precisión, aplicables a los estudios de contaminación de los recursos hídricos subterráneos en el medio agrario.

**Palabras clave:** sondas de capacitancia, drenaje, evapotranspiración, lixiviación de nitratos

### INTRODUCCIÓN

La infiltración en el terreno de aguas con alto contenido en nitrato, derivada del efecto combinado de una excesiva fertilización nitrogenada y unas prácticas de riego poco optimi-

zadas, contribuye al deterioro de los recursos hídricos. Cada vez con más frecuencia se alcanzan concentraciones que pueden afectar a la salud humana y a la calidad ambiental (procesos de eutrofización). En Europa la norma encargada de regular este problema es la Directiva 91/676/CEE, que persigue el doble

objetivo de reducir la contaminación por nitratos ya existente y prevenir la aparición de nuevos procesos contaminantes. Se consideran aguas subterráneas afectadas por la contaminación por nitratos aquellas con contenidos superiores a 50 mg l<sup>-1</sup>, así como las que manifiestan una tendencia creciente que haga prever la necesidad de medidas de protección. La directiva obliga a identificar, cada cuatro años, las zonas vulnerables a la contaminación por nitratos que, en caso de aguas subterráneas, corresponde a las zonas de recarga de los acuíferos afectados o en riesgo de estarlo. Se hace, por tanto, indispensable el desarrollo de estudios encaminados a aumentar la precisión en la dosificación del abono nitrogenado y a optimizar las técnicas de riego. En la última década se han publicado diversos trabajos orientados en este sentido (Archer y Thompson, 1993; Román *et al.*, 1996; Sánchez *et al.*, 1998; Rass *et al.*, 1999; Díez, 2000; Díez *et al.*, 2000). Ramos y Kück (1999) realizaron una revisión crítica sobre los métodos de medida de lixiviación de nitrato en suelos agrícolas, evaluando tanto los métodos de medida del drenaje, como los de estimación de la concentración de nitrato en la disolución del suelo. Para la medida del drenaje, referían como los más comunes aquellos métodos de tipo indirecto basados en el gradiente hidráulico, en el balance de agua o en los modelos de simulación. Respecto a las limitaciones en la utilización de métodos de tipo directo, señalaban como problemas principales el carácter puntual de la medida y la modificación del suelo debida a la instalación del equipo. La reciente introducción de las sondas de capacitancia (EnviroSCAN: Sentek, 2000) en el estudio de la dinámica del agua en el suelo, permitirá obtener balances hídricos más ajustados a partir de datos recogidos en continuo. Aunque las sondas con sensores de capacitancia se han venido utilizando extensivamente en Australia como herramienta de apoyo para el manejo del riego (Buss, 1993) y más recientemente en Estados Unidos, sus múltiples posi-

bilidades en el ámbito científico están prácticamente sin explorar. Paltineanu y Starr (1997), Starr y Paltineanu (1998) y Fares y Alva (1999, 2000) han sido pioneros en su aplicación en trabajos científicos para el estudio de la dinámica del agua en el suelo.

En este trabajo se presenta un nuevo procedimiento, de tipo directo, para el cálculo de los balances hídricos en el suelo, basado en la monitorización en tiempo real del contenido de agua en la zona radicular del suelo y en la zona situada por debajo de la misma. La monitorización en continuo se ha desarrollado mediante la utilización de sondas de capacitancia, dotadas de sensores a diferentes niveles de profundidad. Para cada periodo comprendido entre dos aportes de agua consecutivos (riego o lluvia), el cálculo permite obtener los valores de evapotranspiración, drenaje e incremento o pérdida de agua en cada estrato del suelo. Los procesos de drenaje así evaluados, combinados con la estimación periódica de la concentración de nitrato en la solución del suelo en la zona de drenaje mediante cápsulas porosas de succión (Díez *et al.*, 2000), permiten determinar, en tiempo real, cuándo se producen procesos de lixiviación de nitrato hacia el acuífero subyacente y en qué cantidad. Se trata de una metodología de especial aplicabilidad en estudios específicos en zonas vulnerables a la contaminación por nitratos.

## MATERIAL Y MÉTODOS

### Trabajo de campo

El trabajo de campo se ha llevado a cabo en la Finca Experimental La Poveda, que gestiona el Centro de Ciencias Medioambientales-CSIC. La Finca está situada en la vega del río Jarama (Arganda del Rey, Madrid). El estudio se desarrolló en una parcela experimental de 100 m<sup>2</sup> de superficie. El suelo de la parcela es de textura franco-arenosa (13% de arcilla) en el primer medio metro, con un incremento progresivo en la proporción de arenas hasta alcan-

zar el metro y medio de profundidad (2-3% de arcilla), nivel en el que empiezan a aparecer gravas. El nivel freático fluctúa entre 3,75 y 4,25 m de profundidad a lo largo del año.

A lo largo de un ciclo anual completo, la parcela experimental recibió el siguiente tratamiento: el 25 de abril de 2002 se inició un cultivo de maíz, variedad Tector, con una densidad de siembra de 90000 plantas/ha. Se dio un abono de fondo de 100 Kg ha<sup>-1</sup> de sulfato potásico al 50% y 277 Kg ha<sup>-1</sup> de superfosfato al 18% y un abono de nitrógeno (urea) en cobertera de 130 Kg N ha<sup>-1</sup>. Los riegos se realizaron con pívot, previamente calibrado para obtener valores más ajustados sobre los aportes de agua en cada riego. La cosecha se realizó el 5 de noviembre. En el estudio también se incluye el periodo de intercultivo posterior a la cosecha, desde el 4 de noviembre de 2002 hasta el 15 de abril de 2003.

La instrumentalización de la parcela consta de una sonda EnviroSCAN para la monitorización en continuo de las reservas de agua en el suelo, con cinco sensores situados a 10, 40, 70, 120 y 150 cm de profundidad. Esta sonda pertenece a una red de sondas de capacitancia de similares características instaladas en parcelas experimentales aledañas, cuyos sensores envían sus mediciones con frecuencia horaria a un data-logger localizado in situ. Los sensores permiten conocer el contenido volumétrico de agua en el suelo mediante medidas de capacitancia. La capacitancia de un capacitor depende de su geometría y del material dieléctrico que separa los conductores. En nuestro caso, el dieléctrico es el suelo, el aire, el agua, la materia orgánica del suelo, el tubo de la sonda, etc. Puesto que el capacitor es fijo, las variaciones de capacitancia se deben a los cambios en el dieléctrico del medio circundante, es decir, la frecuencia de oscilación es proporcional a la relación aire/agua en el suelo. La ecuación de calibración almacenada en el data-logger permite la conversión de las medidas de capacitancia en medidas de contenido

volumétrico de agua en el suelo. Cada sensor recoge información que cubre un estrato de 10 cm de suelo, con un radio exterior al tubo de 5-10 cm.

Se emplearon cápsulas porosas de succión para la extracción, por bombeo, de la disolución del suelo a 1,4 m de profundidad. El agua fue recogida y posteriormente analizada químicamente con frecuencia mensual. La determinación de los nitratos se realizó mediante el método N(1-Naftil) etilenodiamida, con un Autoanalizador Techicon AAII (Technicon Hispania). Las concentraciones de nitrato en la disolución del suelo así obtenidas (en el área donde puede producirse drenaje) y las estimaciones de los volúmenes de agua drenada (a partir de las medidas de la sonda EnviroSCAN) permitieron determinar la cantidad de nitrato lixiviado durante cada periodo entre dos aportes de agua consecutivos (lluvia o riego).

#### **Cálculo de balances hídricos**

El *software* específico del sistema EnviroSCAN (Sentek, 2000) permite la representación gráfica, en continuo, de los contenidos de agua en el suelo para cada nivel de profundidad en el que se sitúa un sensor. Cuando los sensores no están colocados cada 10 cm de profundidad, el *software* también permite obtener estimaciones interpoladas del contenido de agua en el estrato entre dos sensores a mayor distancia. La interpolación sólo es válida en estratos de textura y estructura homogénea.

El procedimiento para el cálculo de los balances hídricos en el suelo está basado en la monitorización, mediante el sistema EnviroSCAN, con frecuencia horaria, del contenido de agua en el estrato de suelo con mayor actividad radicular (hasta 75 cm de profundidad, para el cultivo de maíz) y en el estrato situado por debajo de la misma (75-155 cm de profundidad). Para cada periodo comprendido entre dos aportes de agua consecutivos, el cálculo permite obtener los valores de evapotranspiración (independientemente del tipo de cubierta vege-

tal) y drenaje, así como las variaciones en el contenido de agua en ambos estratos. Se ha considerado agua de drenaje aquella que supera el nivel de 155 cm de profundidad, debido a la textura gruesa en esta zona (de mayor contenido en grava) y a la proximidad del nivel freático, lo que hace irreversible su movimiento

descendente.

En primer lugar se muestran los cálculos para el estrato superior, en el que se pueden dar, tanto procesos de evapotranspiración, como procesos de drenaje hacia las capas inferiores (cuando se produce un aporte de agua en exceso). En la Figura 1 se muestran las variacio-

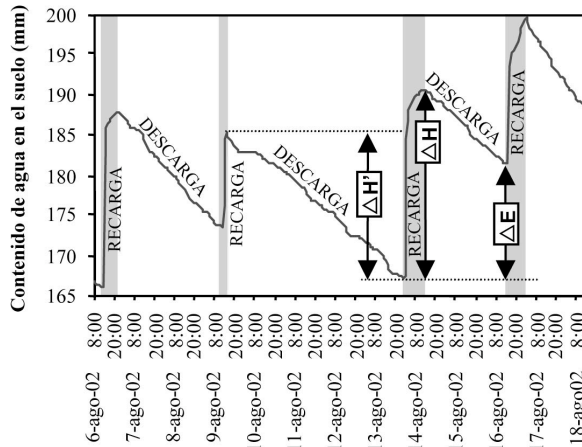


FIGURA 1. Variaciones en el contenido de agua en el suelo (de 5 a 75 cm de profundidad) durante cuatro riegos del mes de agosto. Se señalan los periodos de recarga de agua durante cada riego, y los periodos de descarga (en los que no existe aporte de agua).  $\Delta H$ ,  $\Delta H'$  y  $\Delta E$  se definen en el texto.

nes en el contenido de agua en el estrato de 5 a 75 cm de profundidad (correspondiente a los sensores de 10 a 70 cm de profundidad) durante cuatro riegos del mes de agosto. Se trata de un gráfico interpolado obtenido mediante el software del sistema. Para cada ciclo entre dos riegos (o aportes por lluvia) existen dos periodos bien diferenciados: El que hemos denominado “recarga de agua”, que se da mientras se produce el riego, y el periodo de “descarga”, en el que no existe aporte de agua.

El incremento de agua en el estrato de 5 a 75 cm de profundidad durante el periodo de recarga ( $\Delta H$ ) se obtiene mediante la diferencia entre el valor máximo al finalizar el riego y el valor mínimo anterior al riego. A su vez,  $\Delta H$  corresponde a la siguiente expresión:

$$\Delta H = (LL + R) - (ET_T + \text{infiltr}_T) \quad (1)$$

donde  $(LL + R)$  corresponde al aporte de agua por lluvia y/o riego (ambos conocidos) y  $(ET_T + \text{infiltr}_T)$

+  $\text{infiltr}_T$ ) representa la pérdida de agua en el estrato por evapotranspiración y/o infiltración durante el periodo de recarga, cuyo valor puede ser despejado.

La pérdida de agua en el estrato de 5 a 75 cm durante el periodo de descarga ( $\Delta H'$ ) se obtiene por diferencia entre el valor máximo tras finalizar el riego (o lluvia) del ciclo actual y el siguiente valor mínimo (previo al siguiente aporte de agua). Como durante el periodo de descarga no existe aporte de agua,  $\Delta H'$  se expresaría como:

$$\Delta H' = (ET_d + \text{infiltr}_d) \quad (2)$$

donde la evapotranspiración y la infiltración corresponden exclusivamente al periodo de descarga. La ganancia o pérdida de agua en el estrato de 5 a 75 cm ( $\Delta E$ ) se obtiene por diferencia entre los valores mínimos entre dos ciclos de riego consecutivos (véase Figura 1).

Para cada ciclo completo entre dos rie-

gos, incluyendo los periodos de recarga y descarga, las pérdidas por evapotranspiración e infiltración totales se expresarían como:

$$\text{infiltr} + \text{ET} = (\text{ET}_r + \text{infiltr}_r) + (\text{ET}_d + \text{infiltr}_d) \quad (3)$$

La estimación de la infiltración hacia el estrato inferior se describirá a continuación y, por diferencia, puede determinarse la evapotranspiración.

Igual que en el caso del estrato del nivel radicular, anteriormente descrito, el gráfico interpolado de las variaciones en el contenido de agua para el estrato de 75 a 155 cm de profundidad (correspondiente a los sensores de 70 a 150 cm) se obtiene a partir del software del sistema. Debe considerarse que, generalmente, existe cierto desfase temporal entre los aportes de agua en superficie y el movimiento del agua en las zonas más profundas; además, el agua acumulada en los distintos niveles del suelo también puede estar implicada en los procesos de drenaje. Tanto durante el periodo que hemos denominado de recarga, como durante el periodo de descarga, pueden darse tres tipos de ocurrencia en el gráfico interpolado para el estrato de 75 a 155 cm:

- Que no exista variación en el contenido de agua, lo que significa, generalmente, que no se está produciendo infiltración desde la capa superior, y que tampoco existe drenaje por debajo 155 cm. Esto ocurre cuando los valores en contenido de agua son muy bajos en el estrato.

- Que exista un proceso de recarga (gráfico ascendente), correspondiente a la infiltración desde la capa superior (cuantificable en el gráfico).

- Que exista un proceso de descarga del agua acumulada en el estrato hacia el acuífero (gráfico descendente, indicador de la existencia de drenaje).

La observación de las variaciones en el contenido de agua del gráfico interpolado de 75 a 155 cm proporciona información cuantitativa para cada periodo en el que se produce infiltra-

ción desde la capa superior a la inferior, y drenaje, desde la capa inferior hacia el acuífero. Sin embargo, al no tratarse de un sistema cerrado, durante los momentos de aporte de agua en exceso, podrían darse situaciones de equilibrio dinámico, donde las entradas y salidas de agua en el estrato inferior se compensasen en mayor o menor medida; el alto contenido en gravas y arenas a ese nivel de profundidad podría favorecer un drenaje excepcionalmente rápido en caso de sobrepasarse, eventualmente, la capacidad de campo del suelo. Como herramienta correctiva, la observación de picos bruscos en la curva del contenido de agua a 150 cm, a escasas horas del aporte de agua en superficie, proporciona información sobre la aparición de este tipo de evento, que debe ser evitado.

## RESULTADOS

En la Figura 2 se muestra el curso temporal del contenido de agua en el suelo a 10, 40, 70, 120 y 150 cm de profundidad, monitorizado con frecuencia horaria. Durante los meses de junio, julio y agosto se observa un conjunto de picos bien definidos, que corresponden a los aportes de agua durante el periodo de riegos. El resto de las entradas de agua se debieron a aportaciones por lluvia. Se observa que a 40 cm de profundidad el contenido de agua no sigue las mismas pautas que a 10 y 70 cm (en particular durante los riegos de 2002); este hecho se explica por la existencia de una fina capa con mayor contenido en arcillas, que favorecen la retención de agua a ese nivel (en parcelas experimentales adyacentes sucede algo similar, aunque varía ligeramente la profundidad de la capa con mayor capacidad de retención del agua: datos no publicados). Los picos en las curvas de 120 y 150 cm de profundidad indican los momentos en los que se produjo infiltración de agua desde el estrato superior. Las zonas descendentes en las curvas de 120 y 150 cm muestran los periodos en los que se produjo drenaje. Se observa un drenaje im-

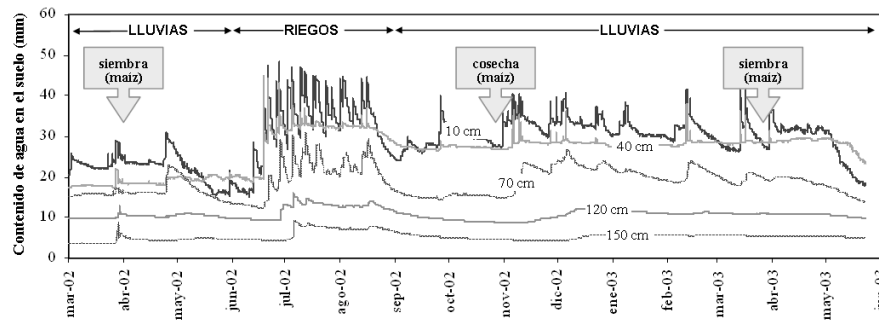


FIGURA 2. Curso temporal del contenido de agua en el suelo a 10, 40, 70 y 120 cm de profundidad. Valores monitorizados con frecuencia horaria mediante una sonda EnviroSCAN. Se señalan los periodos de riego y lluvias y las fechas de siembra y cosecha del cultivo de maíz.

TABLA 1. Balances hídricos y estimación del nitrógeno lixiviado durante los periodos de cultivo de maíz e intercultivo posterior.

	Cultivo de maíz 25-4-02 a 5-11-02	Intercultivo 5-11-02 a 15-4-03
<b>Nº DE DÍAS:</b>	195	161
<b>ENTRADAS DE AGUA:</b>		
Lluvia (mm)	168	451
Riego (mm)	782	0
<b>Total:</b>	950	451
<b>DISTRIBUCIÓN DEL AGUA:</b>		
Evapotranspiración (mm)	701	368
Drenaje (mm)	201	41
Recarga de 0-75cm (mm)	57	23
Recarga de 75-155cm (mm)	-9	19
<b>Total:</b>	950	451
<b>NITRÓGENO LIXIVIADO (Kg N-NO<sub>3</sub> ha<sup>-1</sup>):</b>	60	15

portante durante la época de riegos, lo cual indica un aporte de agua en exceso al cultivo. Asimismo, aunque de menor intensidad, también pueden apreciarse procesos de drenaje durante la fase de intercultivo, con las lluvias de otoño, invierno y primavera.

En la Tabla 1 se presentan los balances hídricos para el periodo de cultivo de maíz y el periodo de intercultivo, calculados mediante el método descrito. El aporte de agua durante la fase de cultivo (procedente en su mayor parte de los riegos de junio-agosto) fue, aproximadamente, el doble que durante la fase de intercultivo (debido exclusivamente a la lluvia). La

evapotranspiración siguió una pauta similar, el doble durante la fase de cultivo, y el drenaje fue cinco veces superior durante ese mismo periodo. El valor medio de la concentración de nitrato en la disolución del suelo durante el periodo de cultivo a 1,4 m de profundidad fue de  $148 \pm 34$  mg l<sup>-1</sup> (media  $\pm$  desviación estándar, a partir de valores mensuales), mientras que durante el intercultivo ascendió a  $191 \pm 25$  mg l<sup>-1</sup>. Las cantidades de nitrógeno lixiviado hacia el acuífero durante el periodo de cultivo fueron, sin embargo, cuatro veces superiores a las registradas en la fase de intercultivo, como consecuencia de la distribución temporal de los

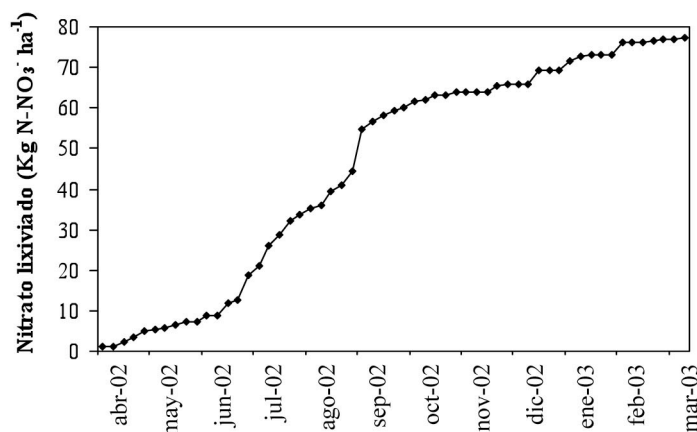


FIGURA 3. Nitrato lixiviado durante el ciclo anual (incluye los periodos de cultivo e intercultivo). Se representa el nitrógeno acumulado por hectárea en un gráfico de línea apilada.

procesos de drenaje. En la Figura 3 se muestra el curso temporal en el proceso de lixiviación de nitrato durante el ciclo anual completo. Se observa, nuevamente, que la máxima lixiviación coincide con el periodo de riegos, cuando el proceso de drenaje alcanzó su mayor intensidad.

## DISCUSIÓN

Durante la mayor parte del siglo XX la agricultura estuvo ligada a la idea de producción, por ese motivo se concentraban esfuerzos en el desarrollo de métodos de campo y procedimientos para el cálculo de balances, aplicables generalmente a los periodos de cultivo. La agricultura actual, sin embargo, esta ligada al concepto de sostenibilidad. Es necesario, por tanto, actualizar las metodologías para poder abordar estudios de tipo extensivo que permitan investigar aspectos relacionados con la conservación de los recursos naturales en el medio agrario a lo largo de todo el ciclo anual.

El cálculo de los balances hídricos mediante el sistema propuesto precisa del conocimiento de los aportes reales de agua por riego y lluvia; sin embargo, tales valores sólo se suelen conocer de modo aproximado. Por este motivo y para evitar desajustes en el cálculo, es

muy importante realizar una revisión previa y una calibración adecuada del sistema de riego, además de contar con medidas fiables de los aportes pluviométricos. Dependiendo de las características del suelo, se debe colocar un número de sensores suficiente para que las interpolaciones, si fuesen necesarias, sean representativas. También debe considerarse la profundidad máxima a la que se puede producir actividad radicular en cada tipo de cultivo, puesto que este nivel será el que delimite el estrato superior, en el que se dan procesos de evapotranspiración, del resto del suelo. La representación gráfica del contenido de agua en el suelo que se genera a partir de cada sensor permite determinar la profundidad hasta donde llega la actividad radicular del cultivo en cada momento: la observación a escala horaria de la presencia, o ausencia, de oscilaciones diarias debidas a la evapotranspiración, proporciona información veraz sobre el nivel de profundidad que va alcanzando la raíz con el paso del tiempo. Por último, cuanto mayor sea la proximidad al nivel freático del último sensor, mayor será la precisión de los cálculos interpolados en el balance hídrico.

Hasta ahora, el estudio de la dinámica del agua en el suelo era abordado mediante aproximaciones, utilizando métodos gravimé-

tricos o sondas de neutrones. El desarrollo de la técnica TDR y la incorporación de sistemas automatizados para la monitorización de datos han facilitado este tipo de estudios, si bien, existe el inconveniente de que el área de estudio se ve limitada por la necesidad de una distancia inferior a 25 m de cable entre la sonda TDR y el data-logger (Heimovaara, 1993). Otra limitación consiste en la dificultad de monitorizar profundidades concretas de suelo. Sánchez-Pérez *et al.* (1999) han descrito un método alternativo que permite la caracterización del perfil hídrico del suelo a partir de la inversión de una sola señal TDR, sin embargo existen algunos problemas de orden electrónico por resolver para la obtención de una señal limpia en sondas de longitud inferior a 50 cm. Estas cuestiones se ven solventadas con el reciente desarrollo de las sondas multisensor de capacitancia (Paltineanu y Starr, 1997; Sentek, 2000).

Debido a las dificultades que entraña la medición de la evapotranspiración, la literatura científica recoge métodos de estimación de tipo indirecto, a partir de datos climáticos, generalmente aplicables a cultivos concretos, pero no a periodos de intercultivo. Doorenbos y Pruitt (1984), Jensen *et al.* (1990), Burman y Pochop (1994) y Allen *et al.* (1994) realizaron revisiones sobre estos métodos. Los valores de evapotranspiración (durante el periodo de cultivo) obtenidos mediante el método que aquí se presenta se encuentran en concordancia con los obtenidos por otros autores, mediante métodos de tipo indirecto, en cultivos de maíz en áreas templadas (Starr y Paltineanu, 1998; Micucci *et al.*, 2003).

## CONCLUSIONES

Las sondas de capacitancia ofrecen medidas precisas, en tiempo real, del contenido de agua en el suelo.

El procedimiento de cálculo que se describe en este trabajo para la obtención de balances hídricos en el suelo, basado en la

monitorización en continuo del contenido de agua en la zona radicular y en la zona situada por debajo de la misma, mediante sondas de capacitancia, permite conocer con gran precisión la cantidad de agua que se destina a evapotranspiración, recarga en el perfil del suelo o drenaje, para cada evento de aporte de agua en superficie (riego o lluvia). La estimación de los de drenajes, a partir del balance hídrico, combinada con la determinación periódica de la concentración de nitrato en la disolución del suelo mediante cápsulas porosas de succión, permite cuantificar el nitrógeno lixiviado hacia las aguas subterráneas en tiempo real.

La evapotranspiración obtenida a partir del método propuesto presenta la ventaja, frente a otros métodos de tipo indirecto, de que puede ser estimada tanto durante los periodos de cultivo (independientemente del tipo de cultivo y de su estado fenológico), como durante los periodos de intercultivo (sin cobertura vegetal, o cobertura de plantas adventicias diversas), lo cual amplía su aplicabilidad y la hace extensible a estudios en áreas naturales.

La metodología que aquí se presenta supone una contribución al desarrollo de técnicas para evaluar el efecto de las prácticas de fertilización agrícola sobre los procesos de contaminación de las aguas subterráneas, resultando de especial aplicabilidad en el estudio y seguimiento de las zonas vulnerables a la contaminación por nitratos. Los resultados ponen de manifiesto la necesidad de abordar paralelamente la problemática del ajuste en la dosificación de los fertilizantes y la optimización de los sistemas de riego, mediante la monitorización y control de los procesos de drenaje.

## AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo ha sido financiado con fondos del Proyecto del Plan Nacional I+D AGL2001-2214-C06-02. Nuestro agradecimiento al personal de la Finca Experimental La Poveda, por su valiosa colaboración en los trabajos de campo.



## REFERENCIAS

- Allen, R.G., M. Smith, L.S. Perira, A. Perrier (1994): An update for the calculation of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin* 43, 35-91.
- Archer, J., R. Thompson (1993): Solving the nitrate problem: Progress in research and development. *AFF Publ.*, London.
- Burman, R., L.O. Pochop (1994): Vaporation, vapotranspiration, and climatic data. *Elsevier*, Amsterdam.
- Buss, P. (1993): Use of capacitance based measurements of real time soil water profile dynamics for irrigation scheduling. Proc. Natl. Conf. Irrig. Assoc., Australia and Natl. Committee Irrig. Drain. Launceston, Tasmania. 17-19 May 1993. *Irrig. Assoc. of Aust.*, Homebush, NSW.
- Díez, J.A. (2000): Optimización de la fertilización nitrogenada: procedimiento de análisis de suelo, toma de muestra y elección del tipo de fertilizante. *Edafología*, 6, 73-84.
- Díez, J.A., R. Caballero, R. Román, A. Tarquis, M.C. Cartagena, A. Vallejo (2000): Integrated fertilizer and irrigation management to reduce nitrate leaching in Central Spain. *J. Environ. Qual.* 29, 1539-1547.
- Doorenbos, J., W.O. Pruitt (1984): Crop water requirements. *FAO irrigation and drainage paper* nº 24. Rome.
- Fares, A., K. Alva (1999): Estimation of citrus evapotranspiration by soil water mass balance. *Soil Sci.* 164, 302-310.
- Fares, A., K. Alva (2000): Soil water components based on capacitance probes in a sandy soil. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 64, 311-318.
- Heimovaara, T.J. (1993): Design of triple-wire time-domain reflectometry probes in practice and theory. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 77, 1410-1417.
- Jensen, M.E., R.D. Burman, R.G. Allen (1990): Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE Manuals and reports on engineering practice Nº 70. *Am. Soc. Civil Engrs.*, New York.
- Micucci, F.G., M.A. Taboada, R. Gil (2003): El agua en los sistemas extensivos, II. Consumo y eficiencia de uso del agua de los cultivos. *Arch. Agon.* 7, 1-4.
- Paltineanu, I.C., J.L. Starr (1997): Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: Laboratory calibration. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 61, 1576-1585.
- Ramos, C., M. Kücke (1999): Revisión crítica de los métodos de medida de la lixiviación de nitrato en suelos agrícolas: 25-32. Estudios de la zona no saturada del suelo. Eds. R. Muñoz-Carpena, A. Ritter, C. Tascón ICIA Tenerife.
- Rass, D.P., J.T. Ritchie, W.R. Peterson, T.L. Loudon, E.C. Martin (1999): Nitrogen management impacts on yield and nitrate leaching in inbred maize systems. *J. Environ. Qual.* 28, 1365-1371.
- Román, R., R. Caballero, A. Bustos, J.A. Díez, M.C. Cartagena, A. Vallejo, A. Caballero (1996): Water and solute movement under conventional corn in Central Spain: I. Water balance. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 60, 1530-1536.
- Sánchez, L., J.A. Díez, A. Vallejo, M.C. Cartagena, A. Polo (1998): Estimate of mineralized organic nitrogen in soil using nitrogen balances and determining available nitrogen by the electro-ultrafiltration technique. Application to Mediterranean climate soil. *J. Agric. Food Chem.* 46, 2036-2043.
- Sánchez-Pérez, J.M., J.P. Laurent, M. Bohy, A.V. Auzet, J.L. Thony (1999): Evaluación de un Nuevo método de caracterización del perfil hídrico del suelo a partir de la inversión de una sola señal TDR: 33-38. Estudios de la zona no saturada del suelo. Eds. R. Muñoz-Carpena, A. Ritter, C. Tascón ICIA Tenerife.
- Sentek (2000): EnviroSCAN manual. 1999-

2000 Sentek Pty Ltd; EnvioSCAN Versión 4.1. [www.sentek.com.au](http://www.sentek.com.au).

Starr, J.L., I.C. Paltineanu (1998): Soil water dynamics using multisensor capacitance probes in nontraffic interrows of corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62, 114-122.