

## SUSTITUCIÓN DE BARBECHOS POR CULTIVOS CAPTURA: EFECTO EN EL BALANCE HÍDRICO Y EN LA LIXIVIACIÓN DE NITRATOS

J.L. Gabriel<sup>1</sup>, M. Quemada

<sup>1</sup> Dpto. Producción Vegetal: Fitotecnia, ETSI Agrónomos, Avda. Complutense s/n, Universidad Politécnica de Madrid, 28040 Madrid, Spain, joseluis.gabriel@upm.es.

**RESUMEN.** El empleo de cultivos captura se ha presentado como una alternativa que reduce la contaminación por nitratos de la zona saturada frente al barbecho, tanto por reducir el N disponible en el suelo como el agua percolada por debajo del sistema radical. Este estudio pretende evaluar el impacto de sustituir el barbecho por cultivos captura en el balance hídrico y en la lixiviación de nitratos. El ensayo transcurrió durante 4 años y se estudiaron tres tratamientos: cebada (*Hordeum vulgare* L.), veza (*Vicia villosa* L.) y barbecho durante el periodo intercultivo del maíz (*Zea mays* L.). Se tomaron medidas directas del contenido de agua del suelo en continuo hasta 1.3 m de profundidad mediante sondas EnviroSCAN<sup>®</sup> y muestra de la solución de suelo con cañas de succión a esa profundidad cada 15 días. Además se midió el porcentaje de suelo cubierto por los cultivos captura mediante análisis de imágenes digitales y la profundidad efectiva de raíces para el cálculo del agua evapotranspirada mediante las sondas EnviroSCAN<sup>®</sup>. Estas medidas directas se complementaron con el empleo de un modelo de movimiento de agua en el suelo (WAVE) para el cálculo del agua percolada, que multiplicada por la concentración de nitratos medida en la solución de las cañas, permitió obtener la lixiviación en profundidad. Se realizó una calibración inversa del modelo, optimizando los parámetros que describen las propiedades hídricas del suelo y la extracción de agua por la planta. Los resultados obtenidos mostraron que al remplazar el barbecho por cultivos captura se redujo la lixiviación de nitratos, especialmente en la cebada.

**ABSTRACT.** Using catch crops in spite of fallow is an alternative to reduce nitrate contamination in the vadose zone, because they reduce soil N availability and drainage. This study aims to evaluate the impact of replacing bare fallow by catch crops in the water balance and in the nitrate leaching of an irrigated agricultural system. The study was conducted during 4 years. Three treatments were studied: barley (*Hordeum vulgare* L.), vetch (*Vicia villosa* L.) and fallow during the intercropping period of maize (*Zea mays* L.). Continuous soil water content was measured to 1.3 m depth with EnviroSCAN<sup>®</sup> sensors, and soil solution were collected with suction cups every 15 days. Determination of ground cover was based on digital image analysis, and effective root depth on sensor readings. These direct measurements allowed calculating drainage based on a soil water movement model (WAVE). A model inverse calibration was conducted by optimizing the soil hydraulic properties and crop parameters. Nitrate leaching was obtained as the product of nitrate concentration on the soil

solution and the volume of drainage. The results showed that replacing fallow by catch crops reduced nitrate leaching, particularly in the barley treatment.

### 1.- Introducción

Los cultivos captura se han desarrollado en los sistemas agrarios en los que hay cultivos principales de verano y un invierno relativamente suave y no excesivamente seco que les permita un buen establecimiento. Reemplazar un suelo desnudo por cultivos captura puede mejorar la estabilidad de agregados y la capacidad de retención de agua, a la vez que reducir la erosión y la compactación o controlar el desarrollo de enfermedades y malas hierbas. En sistemas mediterráneos su introducción ha estado limitada por la competencia por agua. Sin embargo, en los regadíos podría asegurarse el establecimiento de estos cultivos y combinar los beneficios aportados con las posibles desventajas de su introducción. Es necesaria información para definir las condiciones en que la introducción de cultivos captura mejora la sostenibilidad de estos sistemas.

Los regadíos europeos de la zona mediterránea suelen estar abundantemente fertilizados para alcanzar altas producciones. Pero el fertilizante recuperado en el momento de la cosecha por la mayoría de los cultivos no suele ser mayor del 50% y la consecuencia es que hay un elevado riesgo de contaminación de las aguas subterráneas. Así, reemplazar el suelo desnudo por cultivos captura se presenta como una técnica que incrementa la retención del exceso de N inorgánico en el suelo, reduciendo la lixiviación durante el periodo de lluvias.

Los modelos calibrados en campo son herramientas muy útiles para comparar técnicas agrícolas, que de otra forma requerirían grandes superficies de ensayos y numerosas y costosas medidas. En concreto, los modelos numéricos basados en los procesos físicos del balance hídrico del suelo permiten paliar la ausencia de medidas. Pero para emplear estos modelos es necesario conocer bien los parámetros introducidos para poder precisar sus valores y que la simulación sea precisa.

El objetivo de este estudio fue evaluar el impacto de sustituir el barbecho por cultivos captura en el balance hídrico y en la lixiviación de nitratos de un sistema de regadío. Se aplicó el cálculo del balance hídrico basándose en la calibración inversa de un modelo numérico con datos medidos de perfiles de humedad del suelo.

## 2.- Material y métodos

El estudio tuvo lugar en una parcela en monocultivo de maíz (*Zea mays* L.) en Aranjuez (Madrid, España) durante un periodo de cuatro años (desde octubre de 2006 hasta abril de 2010) en un suelo franco arcillo limoso (Calcixercept típico; Soil Survey Staff, 2003) y con un clima Mediterráneo semiárido (Papadakis, 1966).

Se distribuyeron al azar doce parcelas de 12x12 m<sup>2</sup> en tres tratamientos con cuatro repeticiones: cebada (*Hordeum vulgare* L., cv. Vanessa), veza (*Vicia villosa* L., cv. Vereda) y suelo desnudo. Los cultivos captura se sembraron a voleo, con una dosis de siembra de 180 y 150 kg ha<sup>-1</sup> de cebada y veza respectivamente, seguido de un pase de cultivador superficial (5 cm) a principios de octubre (5/10/2006, 11/10/2007, 9/10/2008 y 5/10/2009) y se mataron con una aplicación de glifosato al 2% a la salida del invierno (22/3/2007, 24/3/2008, 11/3/2009 y 15/3/2010), dejando el residuo seco en el suelo. Esto permitió desbrozar el residuo seco y realizar siembra directa de maíz en todo el ensayo a principio de abril, para cosecharlo a final de septiembre o principio de octubre. Durante el periodo del maíz se fertilizó el ensayo con 210 kg N ha<sup>-1</sup> de nitrato amónico en dos coberteras. La fertilización con fósforo y potasio, así como el resto de tratamientos fitosanitarios, fueron los tradicionales de la zona. Solo se aplicó riego durante el cultivo del maíz y se ajustó a la ET<sub>c</sub> del cultivo, evitando en lo posible el drenaje durante este periodo.

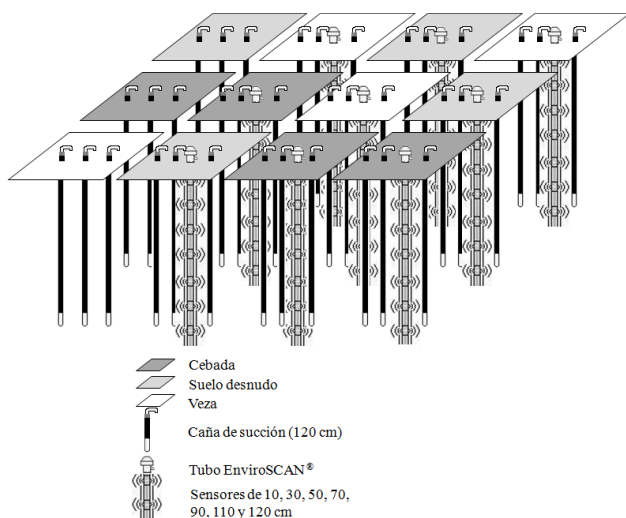


Fig 1. Diseño experimental y distribución de sensores y cañas de succión en las parcelas.

Para el cálculo de la ET<sub>0</sub> por el método de Penman-Monteith se contó con una estación meteorológica CR23X de Campbell Scientific a pie de parcela, provista además de pluviómetro para medir el agua de lluvia caída. Para la medida de la humedad en el suelo se contó con 9 tubos de EnviroSCAN® distribuidos en tres de las repeticiones de cada uno de los tres tratamientos. Cada tubo constó de 7 sensores situados cada 20 cm desde 10 cm de profundidad hasta 130 cm. Los sensores fueron calibrados (Gabriel et al. 2010) y tomaron lecturas horarias en campo

durante todo el tiempo que duró el ensayo. Para la medida de la concentración de amonio y nitratos en el lixiviado se contó con 36 cañas de succión de capsula cerámica porosa (3 cañas en cada parcela) a 120 cm de profundidad. A estas cañas se les aplicó vacío hasta una tensión próxima a 333 cm y se dejaron en campo durante todo el ensayo, recogiendo muestra y aplicando la tensión de nuevo cada 15 días o después de un evento importante de lluvia. Para la medida de la evolución de la cubierta de los cultivos captura se tomaron fotografías digitales a 130 cm de altura con un trípode y se midió la altura de la cubierta en cada una de las parcelas. Tanto las fotografías como la altura se tomaron en 4 puntos de referencia para cada una de las 12 parcelas cada 15 días. La cobertura vegetal se analizó mediante el software de análisis de imágenes digitales Sigma Scan Pro5®, automatizado con la macro "Turf Analysis" (Karcher y Richardson, 2005). Con esta cobertura y la altura se calculó el coeficiente de evapotranspiración del cultivo por el método dual de la FAO (Allen et al. 1998) y el índice de área foliar (Mullan y Reynolds, 2010). La profundidad de raíces se estimó mediante el estudio de los datos horarios observados con el EnviroSCAN®. Cuando en cada una de las profundidades se comenzó a detectar pérdida de agua durante las horas de día (cuando ocurre la mayor parte de la transpiración) seguido de periodos sin extracción durante las horas de la noche se estableció que las raíces del cultivo habían alcanzado esa profundidad.

Se calibró el modelo de movimiento de agua en el suelo WAVE (Vanclouster et al. 1996) con datos del primer ciclo de suelo desnudo (2006/07) mediante una calibración inversa de los parámetros hídricos del suelo comparando los valores de contenido de agua en el suelo simulados frente a los observados en los sensores. El modelo de retención de agua empleado fue el de van Genuchten sin histéresis (van Genuchten, 1980) y el de conductividad de flujo de agua el de Mualem (Mualem, 1976). Los parámetros utilizados para cada uno de los 5 horizontes fueron contenido de humedad del suelo en saturación y residual, conductividad hidráulica saturada y las constantes de van Genuchten "n" y "α" (van Genuchten, 1980), que determinan la curva característica de retención de agua en el suelo. La constante "m" del modelo se fijó como igual a 1 menos la inversa de "n". Los rangos de valores posibles se describieron en función de los valores observados en muestras tomadas en una calicata al borde del ensayo. Primero se evaluó la sensibilidad del modelo a los distintos parámetros de entrada por el método de Morris modificado (Morris, 1991; Saltelli et al. 2005), haciendo una primera aproximación a los valores más apropiados para cada parámetro. Este análisis de sensibilidad permitió determinar cualitativamente los parámetros de entrada más influyentes en las condiciones del ensayo. Sobre estos parámetros se realizó una segunda aproximación que dio lugar a los valores definitivos para los 25 parámetros.

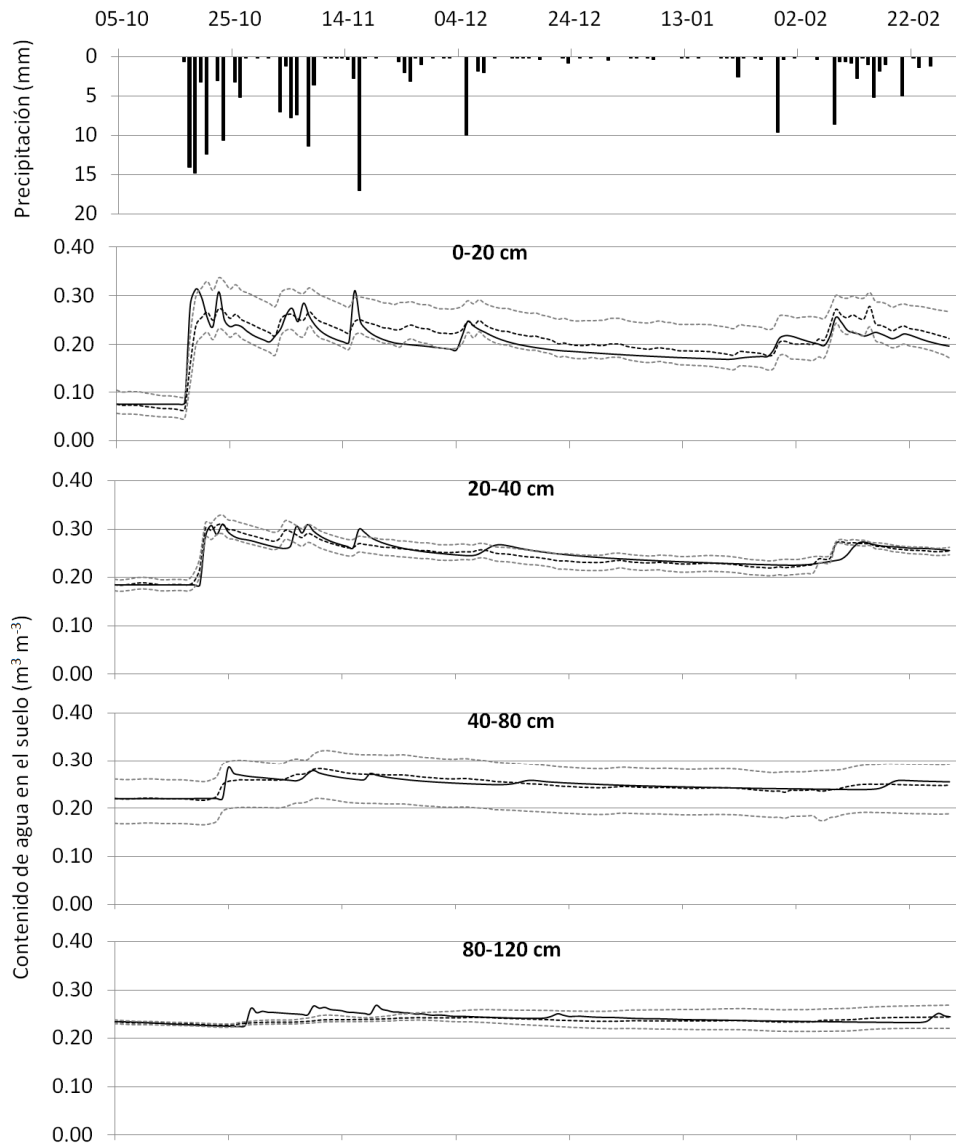
Una vez calibrados los parámetros de suelo se procedió a la calibración de los de planta para el primer periodo (2006/07) de los dos cultivos captura. Los parámetros

ajustados fueron periodo desde la aplicación del glifosato hasta la muerte definitiva de las raíces, los puntos de la curva de absorción de agua (tensión mínima para el inicio de la absorción, tensión mínima para la absorción óptima, tensión máxima para la absorción óptima y la tensión máxima donde hay absorción) y el agua máxima extraíble cada día de cada horizonte. Como datos de entrada del modelo se aportaron la profundidad de raíces, el LAI y el coeficiente de evapotranspiración obtenidos anteriormente.

Una vez calibrados los tres tratamientos se aplicó el modelo a los otros tres periodos (2007/08, 2008/09 y

2009/10) comparando el ajuste de los valores simulados a los datos observados con los sensores. De esta forma se obtuvo el drenaje o agua percolada por debajo de 1.2 m de profundidad para cada tratamiento.

Para la estimación del nitrato lixiviado se multiplicó el volumen de drenaje por la concentración media de  $\text{N-NO}_3^-$  en la solución de las cañas de succión para cada tratamiento. El  $\text{N-NO}_3^-$  se determinó por colorimetría previa reducción en columna de cadmio por el método de Griess-Ilosvay (Keeney y Nelson, 1982).



**Fig 2.** Contenido de humedad en el suelo simulado en las parcelas de suelo desnudo durante el periodo 2006/07, con los parámetros calibrados, comparado con los valores observados medios, máximos y mínimos de tres sondas de capacitancia.

### 3.- Resultados

La cantidad y la distribución de las lluvias variaron considerablemente durante los cuatro periodos, afectando por tanto a las condiciones de humedad en el suelo y al desarrollo de los cultivos captura. Además la temperatura

durante el periodo invernal entre diciembre y enero fue baja (4.2, 4.7, 4.0 y 5.7°C para 2006/07, 2007/08, 2008/09 y 2009/10 respectivamente), por lo que el desarrollo de los cultivos captura fue pequeño durante estos meses. La biomasa total alcanzada por cada cultivo captura fue de 6240, 2257, 1833 y 4114 kg ha<sup>-1</sup> de cebada y 5055, 577,

1337 y 1984 kg ha<sup>-1</sup> de veza para los periodos 2006/07, 2007/08, 2008/09 y 2009/10 respectivamente. El nitrógeno absorbido por los cultivos captura en su biomasa aérea fue de 157, 39, 39 y 77 kg N ha<sup>-1</sup> en la cebada y 179, 20, 56 y 55 kg N ha<sup>-1</sup> en la veza durante los periodos estudiados (Gabriel y Quemada, 2011).

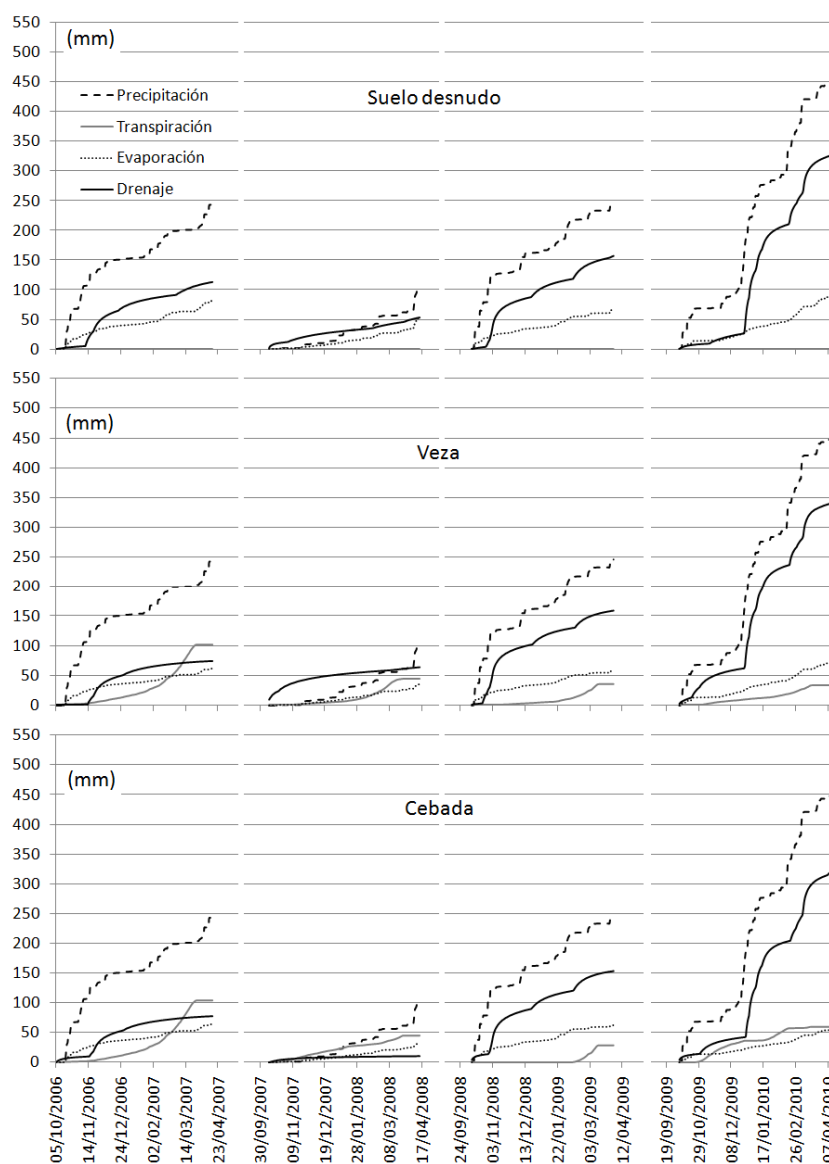
**Tabla 1.** Resumen de los resultados de la optimización en el tratamiento de suelo desnudo de los parámetros hidráulicos del suelo para WAVE.

Profundidad (cm)	$\theta_r$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	n	$K_s$ (cm day <sup>-1</sup> )
0-20	0.060	0.499	1.243	1.441	1009
20-40	0.070	0.420	1.150	1.283	510
40-80	0.105	0.330	1.480	1.172	979
80-120	0.128	0.305	3.400	1.190	525
120-140	0.100	0.298	2.381	1.174	1000

La calibración del modelo en el suelo desnudo dio lugar a los valores representados en la tabla 1. En análisis de sensibilidad mostró que los parámetros con más influencia en el ajuste de las curvas fueron los valores de “n” para los

cinco horizontes (como Mallants et al. (1996) y Muñoz-Carpena et al. (2008)). los valores de humedad residual de los horizontes de 40-80 cm y 80-120cm y la conductividad hidráulica saturada en 0-20 y 20-40 cm, que se reajustaron después de fijar el resto. La Fig. 2 muestra el ajuste entre los valores simulados y los observados medios (así como el valor máximo y mínimo observado de las tres repeticiones) en la calibración del suelo desnudo para los 5 horizontes. Todo el perfil presentó un coeficiente de eficiencia (Cef) de 0.896 y un error cuadrático medio (ECM) de 6.78 mm, similar al observado por Payet et al. (2009).

La calibración del modelo en los suelos con cultivo captura dio lugar a los valores para los parámetros fijados representados en la tabla 2, y produjo un ajuste similar a la del suelo desnudo. En este caso el Cef fue de 0.841 para la veza y 0.809 para la cebada, con un ECM de 10.8 mm y 13.6 mm respectivamente.



**Fig. 3.** Curvas de precipitación, drenaje, evaporación y transpiración simuladas para cada uno de los tres tratamientos en los cuatro periodos de estudio.

**Tabla 2.** Resumen de los resultados de la optimización en los tratamientos de cebada (Cb) y veza (Vz) de los parámetros de planta para WAVE: Fecha de muerte definitiva de las raíces, tensión mínima para el inicio de la absorción ( $h_0$ ), tensión mínima para la absorción óptima ( $h_1$ ), tensión máxima para la absorción óptima ( $h_2$ ), tensión máxima donde hay absorción ( $h_3$ ) y el agua máxima extraíble por las raíces ( $S_{max}$ ) para los distintos horizontes ( $cm^{-1}$ ).

Tratamiento	Muerte	$h_0$ (cm)	$h_1$ (cm)	$h_2$ (cm)	$h_3$ (cm)	$S_{max,0-20}$	$S_{max,20-40}$	$S_{max,40-80}$	$S_{max,80-120}$	$S_{max,120-140}$
Vz	7	-1	-30	-300	-16000	0.010	0.005	0.004	0.003	0.003
Cb	6	-5	-30	-500	-18000	0.009	0.007	0.004	0.003	0.003

El ajuste de las curvas en el resto de los años fue algo inferior que en el periodo de calibración. En el caso del suelo desnudo el ECM varió de 20.5 mm en el periodo 2007/08, a 14.9 mm en 2008/09 y a 13.6 en 2009/10. En el caso de la veza el ECM fue de 12.2, 17.7 y 12.1 mm respectivamente. Y la cebada mostró un ajuste similar con valores de ECM de 14.0, 13.9 y 16.1 mm respectivamente.

**Tabla 3.** Resumen del balance de agua y nitrógeno simulado para los tres tratamientos durante los cuatro periodos de estudio. Precipitación (Prec), evaporación real (Eva), transpiración real (Trans) y drenaje (Dren) todo en mm, concentración de  $NO_3^-$  en  $mg N L^{-1}$  y lixiviado (Lix) en  $kg N ha^{-1}$ .

Periodo	Prec	Eva	Trans	Dren	Con	Lix	
	mm				$mg N L^{-1}$	$kg N ha^{-1}$	
Suelo desnudo	2006/07	250	84	.	113	89.6	101.3
	2007/08	101	51	-	53	6.7	3.6
	2008/09	246	67	.	157	38.5	60.5
	2009/10	453	101	.	346	91.0	315.3
Veza	2006/07	250	63	101	74	53.6	39.5
	2007/08	101	35	44	63	46.9	29.7
	2008/09	246	59	35	159	35.6	56.5
	2009/10	453	79	33	368	60.2	221.7
Cebada	2006/07	250	65	105	78	62.7	48.8
	2007/08	101	31	45	11	0	0.0
	2008/09	246	62	29	154	21.9	33.6
	2009/10	453	60	60	347	11.6	40.2

Una vez tomadas como validas las simulaciones se procedió al análisis de los resultados de drenaje y evapotranspiración obtenidos. Al igual que la distribución de la precipitación fue claramente distinta cada año, el balance de agua en el suelo también fue diferente según los años (fig.3, tabla 3). La evaporación directa desde el suelo osciló entre 51.4 a 100.6 mm en el suelo desnudo, entre 35.5 y 78.7 mm en la veza y entre 31.5 y 64.6 en la cebada. Por otra parte, la transpiración fluctuó entre 32.9 y 101.3 mm para la veza y entre 28.9 y 104.7 mm en la cebada. Los datos de transpiración se ajustaron a las diferencias de producción de biomasa entre los distintos años y los distintos cultivos captura. Además, los años con un mayor desarrollo de la planta antes del invierno (2006/07 para veza y 2006/07 y 2009/10 para cebada) se correspondieron con los años de mayor crecimiento total y con mayor transpiración. Con estos datos, la cantidad de agua percolada por debajo de 120 cm obtenida en el suelo desnudo osciló entre los 53.4 y los 346.5 mm, en la veza entre los 35.5 y los 348.3 mm y en la cebada entre los 10.9 y los 346.8 mm. La reducción en el drenaje en los tratamientos con cultivo captura se correspondió con lo observado por Thorup-Kristensen et al. (2003).

Los lixiviados observados tuvieron mayor concentración de nitratos en las parcelas de suelo desnudo, seguidas de las de veza y menores en las de cebada en la mayoría de los años (Tabla 3). Los valores oscilaron entre 6.7 y 91.0  $mg N-NO_3^- L^{-1}$  para el tratamiento de suelo desnudo, entre 35.6

y

60.2 para el de veza y entre 0 y 62.7  $mg N-NO_3^- L^{-1}$  para el de cebada. Al relacionar las concentraciones medidas con los drenajes estimados se obtuvieron unas pérdidas de  $NO_3^-$  totales de 122.7  $kg N-NO_3^- ha^{-1}$  durante los cuatro periodos en el tratamiento de cebada, de 347.4  $kg N-NO_3^- ha^{-1}$  en el de veza y de 480.7  $kg N-NO_3^- ha^{-1}$  en el de suelo desnudo. El efecto de los cultivos captura en la reducción del lavado fue similar al observado por otros autores en regiones más húmedas (Dinnes et al, 2002; Strock et al. 2004).

#### 4.- Conclusiones

El modelo WAVE se ha mostrado como una herramienta muy útil para el análisis de los balances de agua en las distintas situaciones presentadas. La resolución del problema del movimiento del agua en el suelo mediante ecuaciones físicas y su calibración empleando valores observados ha dado lugar a buenos ajustes en el contenido de agua del suelo. Además, el aumento de biomasa producida se correspondió con aumentos en la transpiración simulada. Estos ajustes permiten dar mayor fiabilidad a las predicciones de drenaje del modelo, pero para ello es necesaria una buena calibración basada en medidas de la humedad de suelo para comprobar que el modelo tiene bien ajustados todos sus parámetros.

La climatología durante el periodo de siembra-implantación del cultivo captura se presentó como un momento crítico para la eficiencia de los cultivos para reducir el lixiviado. En el clima mediterráneo la distribución y la cantidad de las precipitaciones es una fuente de incertidumbre muy importante, por lo que es clave que la cubierta se establezca lo antes posible para estar activa transpirando y absorbiendo N en el momento en el que los eventos importantes de lluvia y la parada invernal se presenten. Los datos de evaporación se ajustaron a las diferencias de producción de biomasa entre los distintos años y los distintos cultivos captura. Los años con un mayor desarrollo de la planta antes del invierno (2006/07 y 2009/10 para cebada y 2006/07 y en menor medida 2009/10 para veza) se correspondieron con los años de mayor crecimiento total y con mayor transpiración. Además, los cultivos captura drenaron menos que el tratamiento de suelo desnudo, la extracción activa de N del suelo permitió un lixiviado con menor concentración de  $NO_3^-$  y por tanto las pérdidas fueron menores. Dada la variabilidad climática interanual, se debería tender a sembrar los cultivos captura todo lo pronto que permita la cosecha del cultivo principal. También puede ser recomendable favorecer la nascencia con un pequeño riego de apoyo en el caso de no llover en los días posteriores.

*Agradecimientos.* Este trabajo ha sido financiado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (proyecto AGL2008-00163) y la Comunidad de Madrid (proyecto AGRISOST, S2009/AGR-1630). Nos gustaría agradecer al personal de la Estación Experimental de La Chimenea (Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Agrario) y al Departamento of Agricultural and Biological Engineering de la University of Florida por su valiosa ayuda.

## 5.- Bibliografía

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. y Smith, M., 1998. *FAO 56 Irrigation and drainage paper: crop evapotranspiration*. Food and Agriculture Organization, Rome.
- Dinnes, D.L., Karlen, D.L., Jaynes, D.B., Kaspar, T.C., Hatfield, J.L., Colvin, T.S. y Cambardella, C.A., 2002. Nitrogen management strategies to reduce nitrate leaching in tile-drained Midwestern soils. *Agron. J.* 94, 153-171.
- Gabriel, J.L., Lizaso, J.I. y Quemada, M., 2010. Laboratory versus field calibration of Capacitance Probes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74, 593-601.
- Gabriel, J.L., Quemada, M., 2011. Replacing bare fallow with cover crops in a maize cropping system: Yield, N uptake and fertiliser fate. *European Journal of Agronomy* 34, 133-143.
- Karcher, D. y Richardson, M., 2005. Batch Analysis of Digital Images to Evaluate Turfgrass Characteristics. *Crop Science* 45, 1536-1539.
- Keeney, D.R. y Nelson, D.W., 1982. Nitrogen - inorganic forms. En Page, A L. *Methods of soil analysis. Part 2: chemical and microbiological properties*: 643-698. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America. Madison, WI, USA.
- Mallants, D., Jacques, D., Vanclooster, M., Diels, J. y Feyen, J., 1996. A stochastic approach to simulate water flow in a macroporous soil. *Geoderma* 70, 299-324.
- Morris, M.D., 1991. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments. *Technometrics* 33, 161-174.
- Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12, 513-522.
- Muñoz-Carpena, R., Ritter, A., Bosch, D.D., Schaffer, B. y Potter, T.L., 2008. Summer cover crop impacts on soil percolation nitrogen leaching from a winter corn field. *Agricultural Water Management* 95, 633-644.
- Mullan, D.J. y Reynolds, M.P., 2010. Quantifying genetic effects of ground cover on soil water evaporation using digital imaging. *Functional Plant Biology* 37, 703-712.
- Papadakis, J., 1966. *Climates of the world and their agricultural potentialities*. DAPCO, Rome, Italy.
- Payet, N., Findeling, A., Chopart, J.L., Feder, F., Nicolini, E., Macary, H.S. y Vauclin, M., 2009. Modelling the fate of nitrogen following pig slurry application on a tropical cropped acid soil on the island of Réunion (France). *Agriculture, Ecosystems and Environment* 134, 218-233.
- Saltelli, A., Ratto, M., Tarantola, S. y Campolongo, F., 2005. Sensitivity analysis for chemical models. *Chemical Reviews* 105, 2811-2827.
- Strock, J.S., Porter, P.M. y Russelle, M.P., 2004. Cover cropping to reduce nitrate loss through subsurface drainage in the northern US Corn Belt. *Journal of Environmental Quality* 33, 1010-1016.
- Thorup-Kristensen, K., Magid, J. y Jensen, L.S., 2003. Cover crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones. *Adv. Agron.* 79, 227-302.
- van Genuchten, M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892-898.
- Vanclooster, M., Viaene, P., Diels, J. y Christiaens, K., 1996. WAVE: a mathematical model for simulating water and agrochemicals in the soil and vadose environment. En: *Reference and user's manual (Release 2.0)*, Institute for Land and Water Management, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.