

Estudio experimental y modelación numérica de la transferencia de nitrato en un suelo arenoso

M. Ibnoussina⁽¹⁾, A. Maslouhi⁽²⁾ y L. Candela⁽³⁾

(1) Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Gharb, BP 79, 1400 Kénitra, Maroc.

(2) Laboratoire de Mécanique des Fluides et des transferts Thermiques, Université IbnTofail, BP 133, 1400 Kénitra, Maroc.

(3) Dep. de Ingeniería del Terreno. Universidad Politécnica de Cataluña, Edificio D-2 C/Gran Capitán s/n. 08034-Barcelona Spain
lucila.candela@upc.edu

RESUMEN

En las últimas décadas, la contaminación de las aguas subterráneas por nitratos en la región de Mnasra (Kenitra, Marruecos) ha sido motivo de una atención especial por la administración pública. Para analizar los procesos que originan dicha contaminación y evaluar el efecto del contenido en arcilla, se ha realizado un estudio experimental en laboratorio. Los ensayos de lixiviado se realizaron sobre 6 columnas de 1 m de altura y 0,52 de diámetro llenas de suelo arenoso, donde se aplicaron 3 tratamientos de fertilizante (0, 100 y 200 kg N/ha). Cada columna se instrumentó con una sonda TDR vertical constituida por 5 segmentos de 15 cm para medir el perfil de humedad en el suelo. El regadío se efectuó mediante un simulador de lluvia. Paralelamente se realizaron simulaciones numéricas mediante el código LEACHM para analizar la transferencia de agua y nitrógeno ($\text{NO}_3\text{-N}$) a través de las columnas. El comportamiento del modelo ha sido satisfactorio; sin embargo para los 3 tratamientos aplicados el modelo sobreestima las pérdidas de nitrato ($\text{NO}_3\text{-N}$) en porcentajes correspondientes al 17%, 5% y 0% para el suelo 1 las infraestima en un 12%, 9% y 10% para el suelo 2.

Palabras clave: contenido de humedad, LEACHM, modelación, nitrato

Experimental study and numerical modeling of the nitrate transfer in a sandy soil

ABSTRACT

Groundwater pollution of the Mnasra area by nitrate is of great concern by the administration since the last years. An experimental study based on column experiments with the objective of assessing the impact of clay and organic matter on nitrate leaching has been carried out. Infiltration tests based on the application of three nitrogen treatments (0, 100 and 200 kg N/ha) were carried out on 6 columns of sandy soils. To monitor water content a TDR probe was vertically installed in the e probes. Irrigation was applied by a rain simulator and LEACHM code was used to study water and nitrogen transfer through the studied columns. The model performance was considered satisfactory although it overestimates losses of nitrogen in soil 1 and underestimates leaching in soil 2.

Key words: LEACHM code, modeling, nitrate, water content

Introducción

Uno de los mayores problemas ambientales derivados de las prácticas agrícolas es el lixiviado de agroquímicos a través del perfil del suelo, con la consecuente posibilidad de contaminar los acuíferos por uso excesivo de fertilizantes y plaguicidas. La región del Gharb, situada al NW de Marruecos, (Fig.1) caracterizada por la presencia de suelos arenosos presenta una importante contaminación de las aguas subterráneas por nitratos de origen agrícola (Zeraouli, 1993; Moussaoui, 1994; SCET-Maroc, 1999; Saadi y Maslouhi, 2003). Para minimizar los impactos producidos por la contaminación por nitrato ($\text{NO}_3\text{-N}$) del acuífero superficial, es necesario conocer los procesos físicos implicados en el transporte de este contaminante.

Aunque no es el objeto de este artículo y no se incidirá en ello, existe en la bibliografía internacional un gran número de publicaciones referentes a métodos de simulación y códigos para valuar el transporte de solutos en suelos agrícolas (Mehran y Tanji, 1974; Saxton et al., 1977; Watts y Hanks, 1978; Selim y Iskan-dar, 1981; Tillotson y Wagenet, 1982; Benbi et al., 1991; Hutson y Wagenet, 1992; Follett, 1995; Izadi et al., 1996). Muchos modelos resuelven de forma numérica la ecuación dispersiva-advectiva (EDA) en medio no saturado, como Bear y Verruijt (1990). Sin embargo, hay diversos estudios que demuestran la existencia de limitaciones de esta ecuación para modelar el transporte de solutos, como por ejemplo la presencia de diferencias importantes entre concentración medida y simulada (Beven et al., 1993). Esta limitación puede ser debida a múltiples factores, pero

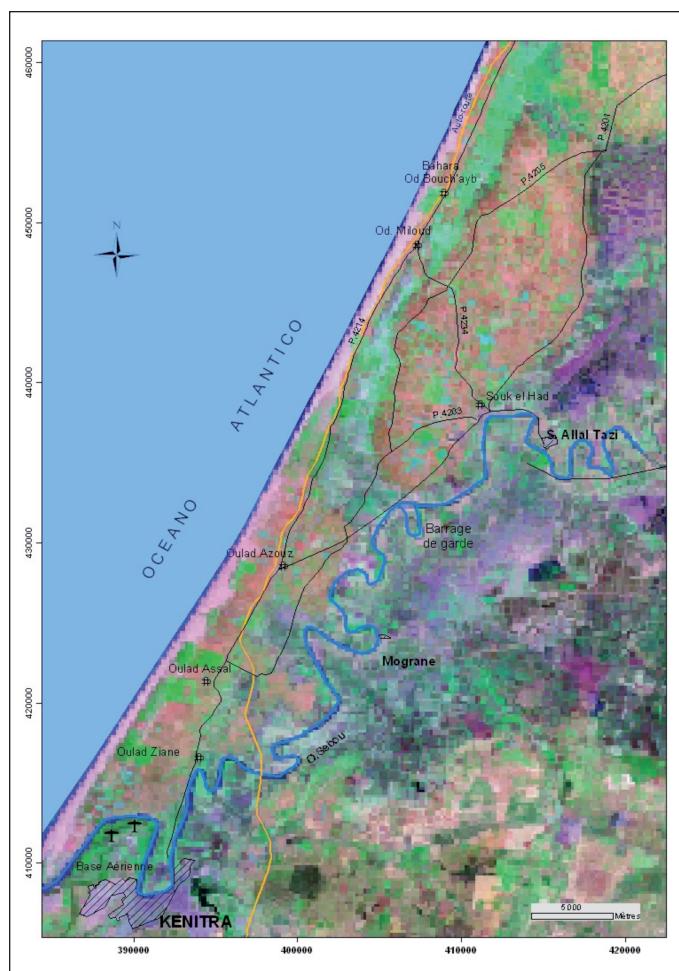


Figura 1. Situación de la región de Mnsra
Figure 1. Location of the study site: the Mnsra region

especialmente a la existencia de transporte preferente en los suelos agrícolas, que no puede ser explicado por la EDA (Kanwar *et al.*, 1985; Ellsworth y Jury, 1991). Para este trabajo de simulación numérica se ha

utilizado el código LEACHM 3 (Leaching Estimation and Chemistry Model) que simula el lixiviado N-NO₃⁻, la distribución del N-NO₃⁻ en la zona radicular y la absorción de agua y nitrógeno por la planta. (Hutson y Wagenet, 1992).

Los objetivos del estudio son, por un lado, simular el flujo del agua, drenaje, y el lixiviado de N-NO₃, a partir de datos procedentes columnas experimental de suelo para evaluar las pérdidas por lixiviado del nitrógeno (N-NO₃). Por otro lado se pretende analizar el efecto de la aplicación de agua (regadío) sobre el transporte y distribución del N-NO₃ mediante el código LEACHM, y finalmente su validación a partir de los datos obtenidos en 6 columnas experimentales drenando un suelo sin cultivar.

Materiales y métodos

Dispositivo experimental y metodología

La investigación se ha realizado en dos tipos de suelo cuyas características fisico-químicas se muestran en la Tabla 1, y con los que se llenaron manualmente 6 columnas de PVC de 1 m de altura y 0,52 m de diámetro (Fig. 2). La compactación se realizó por capas de 15 cm y en el extremo de la columna se colocó una capa drenante constituida por arena fina (0,025 m), arena media (0,025 m) y 0,050 m de gravas estratificadas. El agua de drenaje se obtuvo a partir de un pequeño obturador situado al centro del extremo de la columna. En cada una de las columnas se dispuso de una sonda TDR vertical (Tektronix 1502 TDR; error de medida 2%) constituida por 5 segmentos de 15 cm. Las 6 sondas TDR se conectaron a un multiplexor para realizar medidas del perfil de humedad cada 10 minutos. La calibración de las seis sondas se realizó en un suelo arenoso.

En el marco de este estudio, se han aplicado diver-

	Profundidad cm	ρ_b g.cm ⁻³	N total mg/kg	C total mg/kg	Arena %	Arcilla %
Suelo 1	15	1,46	0,005	0,24	98,4	1,6
	30	1,51	0,003	0,17	97,8	2,2
	45	1,50	0,059	1,8	97,2	2,8
	60	1,49	0,140	1,2	96,60	3,1
Suelo 2	15	1,42	0,666	7,8	89,80	10,2
	30	1,43	0,594	8,4	89,20	10,8
	45	1,44	0,630	3,9	89,80	10,2
	60	1,48	0,383	3,6	86,40	13,6

Tabla 1. Descripción del perfil de los dos suelos estudiados
Table 1. Profile of the two soils under study.

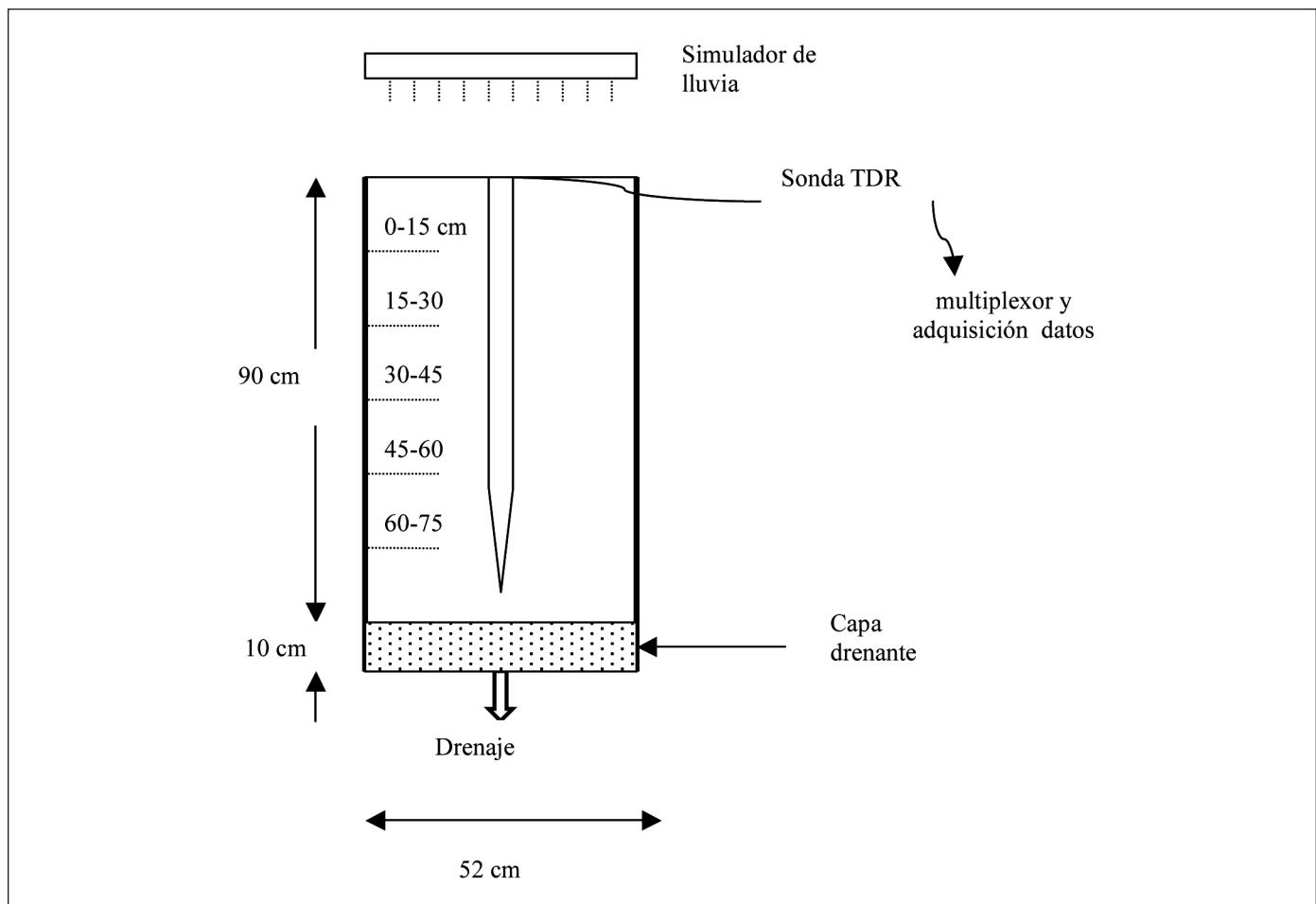


Figura 2. Dispositivo experimental
Figure 2. Experimental soil column

sas intensidades de precipitación en función del tiempo, y su distribución se muestra en la Fig. 3. El riego se realizó mediante un simulador de lluvia por barriado mediante tubos planos insertados en un carro con desplazamiento y a una altura de 1,5 m sobre las columnas de suelo. La simulación se realizó para el periodo comprendido entre el 4 de Mayo (0 h) al 10 de Junio (888 h) del 2002 y la cantidad total simulada equivale a un regadío de 315 mm. En cada columna se aplicó nitrato amónico (NH_4NO_3) en forma granular, con las siguientes concentraciones 0, 100 y 200 kg N/ha. Después de la aplicación se aplicó un riego de 50 mm/h durante 30 minutos. Para impedir la evaporación, las columnas fueron cubiertas después del regadío.

El contenido en nitrógeno (N-NO_3) del agua se analizó mediante el método colorimétrico de reducción de nitratos por Cadmio (Dorich y Nelson, 1984).

Descripción del código LEACHM

LEACHM (Leaching Estimation and Chemistry Model) es un código de flujo unidimensional, transporte y absorción por las plantas de sales disueltas. Está compuesto por distintos subprogramas (LEACHN, LEACHP, LEACHC y LEACHW) que permiten simular diversos procesos (Hutson and Wagener, 1992). En este estudio sólo han sido utilizados los subprogramas LEACHW y LEACHN.

LEACHW simula el régimen de agua en el suelo a partir de la solución de la ecuación de Richards:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \right] - U(z, t) \quad (1)$$

siendo θ el contenido volumétrico de agua (m^3/m^3),

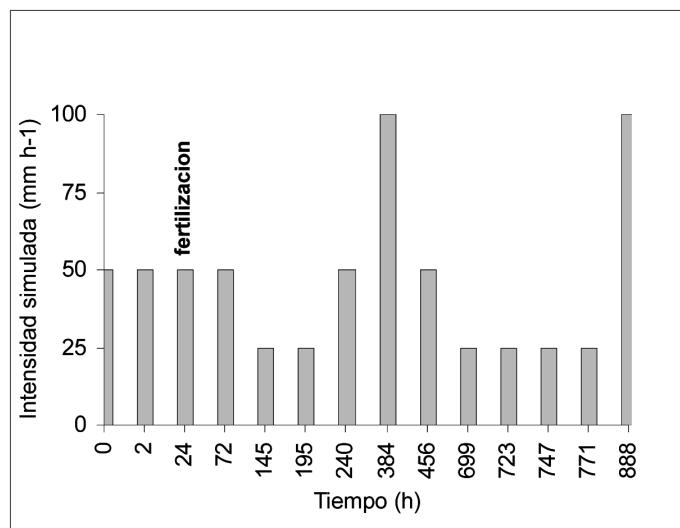


Figura 3. Simulación de la precipitación en función del tiempo. Cada precipitación tiene una duración de 30 minutos

Figure 3. Simulation of the precipitation events lasting 30 minutes

H la presión total del agua en el suelo (mm), K la conductividad hidráulica (mm/d), t tiempo, z profundidad (mm), y U un parámetro que representa las pérdidas de agua por transpiración (1/d) y de valor positivo.

LEACHM estima el valor del potencial de presión a partir del contenido volumétrico de agua mediante la ecuación de retención de Campbell (1974).

El transporte de nitrato se simula mediante la ecuación dispersiva-advectiva

$$\frac{\partial(\theta + \rho K_d + \varepsilon K_H^*)}{\partial t} C = \frac{\partial}{\partial z} \left[\theta D(\theta, q) \frac{\partial c}{\partial z} - qc \right] \pm \phi \quad (2)$$

donde c es la concentración de soluto en la disolución (mg/L), ρ es la densidad aparente del suelo (kg/m^3), K_d es el coeficiente de reparto del soluto entre la fase líquida y la fase sólida (m^3/kg), ε es la porosidad del suelo, K_H es la constante de Henry modificada, q es el flujo de Darcy (m/d), $D(\theta, q)$ es el coeficiente de dispersión (m^2/s), z es la profundidad del suelo (m), y Φ es el término fuente-sumidero ($\text{kg}/\text{m}^3\text{d}$). Los parámetros relacionados con la transformación del nitrógeno se muestran en la Tabla 2.

Condiciones iniciales y de contorno

El tiempo inicial de la simulación ($t=0$) corresponde al 4 de Mayo de 2002 a las 8 h y el final ($t= 1032$ h) al 10 de Junio de 2002; el paso de simulación es un hora. La discretización espacial ha sido de 5 cm hasta una profundidad de 90 cm. La cantidad de precipitación correspondiente a todo el periodo del ensayo y el fertilizante aplicado constituye la condición de contorno de la ecuación de Richards en la superficie de las columnas. La condición de límite inferior de la colum-

Parámetro de modelo	Valor	Referencia
N-NH ₄ (L/kg)	2,6	Clotier <i>et al.</i> (1988)
N-NO ₃ (L/kg)	0	
Coeficiente de difusión molecular (mm ² /d)	120	Hutson and Wagenet (1992)
Coeficiente de dispersión	100	
Factor de eficiencia	0,5	Johnson <i>et al.</i> (1987)
Fracción de humificación	0,2	Johnson <i>et al.</i> (1987)
C/N	10	Stevenson (1982)
Potencial matricial mínimo de transformación	-1500	Hutson and Wagenet (1992)
Constante de mineralización (1/d)	0,0005	Clark (1994)
Constante de desnitrificación (1/d)	0,0	Clark (1994)
Constante de nitrificación (1/d)	0,6	Clark (1994)
Constante de volatilización amonio (1/d)	0,6	Hutson and Wagenet (1992)
Relación NO ₃ / NH ₄	8	Hutson and Wagenet (1992)

Tabla 2. Parámetro de transformación del nitrógeno
Table 2. Parameters used for nitrogen transformation

	Capa(mm)	RMSE ¹	AE ²	EF ³	CRM ⁴
Suelo 1	0 - 150	0,45	-0,027	0,992	-0,435
	150 - 300	0,50	-0,039	0,983	-0,5
	300 - 450	0,04	0,001	0,999	0,006
	450 - 600	0,03	0,001	1	0,005
	600 - 750	0,20	-0,018	0,992	-0,158
Suelo 2	0 - 150	0,32	-0,037	-3,04	-0,275
	150 - 300	0,26	-0,033	0,287	-0,216
	300 - 450	0,17	-0,002	0,782	-0,012
	450 - 600	0,17	0,03	0,868	0,146
	600 - 750	0,18	0,027	0,802	0,151

1: error cuadrático medio (RMSE); 2: error medio (AE), 3: eficiencia de la modelización (EF); 4: media de las desviaciones entre valores medidos y simulados (CRM).

Tabla 3. Estadísticos correspondientes al contenido de humedad en las diferentes capas pertenecientes a los suelos 1 y 2

Table 3. Statistics for water content distribution in soil 1 and 2

na se asimiló a un lisímetro con drenaje libre. Los parámetros de entrada requeridos por LEACHN son: (i) propiedades fisico-químicas del perfil del suelo (Tabla 1), (ii) precipitación (Fig. 3) y (iii) parámetros de transformación del nitrógeno (Tabla 2). Estos parámetros fueron calculados en laboratorio y obtenidos a través de bibliografía.

Resultados y discusión

Evaluación estadística de los resultados simulados

La evaluación de la bondad del modelo se ha basado en la utilización de técnicas estadísticas de estimación del error para valores medidos y simulados del contenido de humedad y de la concentración de N-NO₃. Se ha calculado el error medio (AE), error cuadrático medio (RMSE), eficiencia de la modelización (EF) y la media de las desviaciones entre valores medidos y simulados (CRM). Estos criterios descritos por Loague y Green, (1991) son:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / n}{O_m}} \quad (3)$$

$$EF = \frac{\left(\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right)}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2} \quad (4)$$

$$CRM = \frac{\left(\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i \right)}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (5)$$

$$AE = \frac{1}{n} \sum (P_i - O_i) \quad (6)$$

Los valores óptimos para AE, RMSE, EF y de CRM son 0, 0, 1 y 0, respectivamente. Valores positivos de CRM indican que el modelo infraestima los valores medidos, y los negativos una tendencia a la sobreestimación.

Análisis del contenido de humedad del suelo

Los ensayos se desarrollaron en un suelo sin cultivo, con el objeto de analizar los procesos e incertidumbre asociada exclusivamente al comportamiento del medio poroso. La precisión del modelo para simular la transferencia de agua fue evaluada a partir de los parámetros estadísticos que permiten cuantificar la desviación media entre valores simulados y observados. Como indicadores se han utilizado de acuerdo con Smith *et al.*, (1995) y Jabro *et al.*, (1997) los parámetros EF y CRM para valores de contenido de humedad simulados y medidos. Los valores próximos a 1 y 0 para EF y CRM respectivamente son indicativos de la bondad de la simulación.

Los estadísticos referentes al contenido de humedad simulado y medido en los suelos 1 y 2 durante el período considerado y para las profundidades de 150,

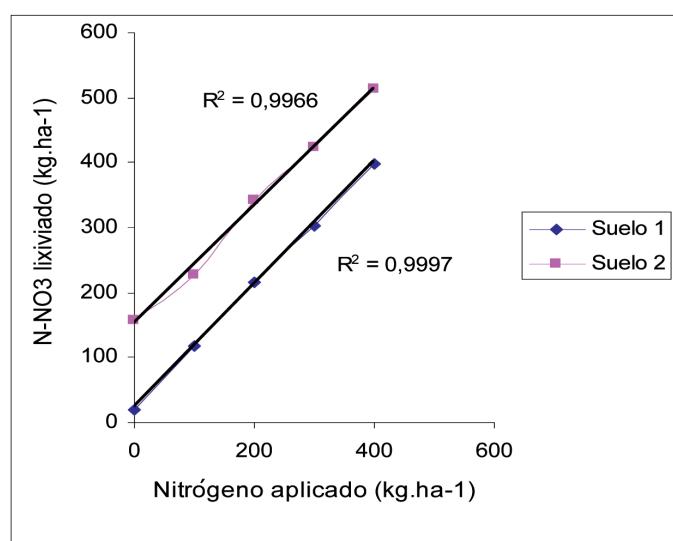


Figura 4. Relación entre nitrógeno simulado y nitrógeno lixiviado para los dos tipos de suelo

Figure 4. Simulated and leached nitrogen for the two soils

300, 450, 600 y 750 mm se muestran en la Tabla 3. Los resultados de la simulación predicen de forma bastante aproximada la variación temporal del contenido en humedad. Sin embargo, para las capas superiores del suelo el modelo estima contenidos de humedad superiores a los medidos de forma sistemática. Esta desviación podría explicarse por un posible efecto de circulación preferencial a través de macroporos, hecho no considerado en el modelo.

LEACHM proporciona mejores resultados del contenido de humedad para las capas más profundas en los dos tipos de suelos. El valor de EF para las capas inferiores (300-450 mm) muestra un incremento del

1.6% para el suelo 1 y de un 63.3% para el suelo 2. Este hecho puede ser explicado por la mayor variabilidad del contenido de humedad en la capa superior del suelo, contenido en arcilla y materia orgánica del suelo 2 y la posible existencia de flujo preferencial que originaría un movimiento rápido de agua a través de la columna. El valor de CRM es ligeramente positivo para las capas profundas del suelo 1, y los valores estimados son ligeramente inferiores a los observados. El suelo 2, con mayor contenido de arcilla, muestra valores negativos de CRM en las capas superiores y en consecuencia, una sobreestimación de los valores observados. Estos valores aumentan de forma positiva en las capas profundas que presentan una subvaloración.

Análisis del lixiviado de nitrato

La comparación estadística de los perfiles de concentración de N-NO₃ simulado y observado y correspondiente a todos los tratamientos realizados se muestra en las Tablas 4 y 5. Para profundidades de 150 y 300 mm y de forma general, los valores simulados son mayores que los medidos. Sin embargo, se aprecia que el modelo numérico sobreestima las concentraciones de nitrato obtenidos inmediatamente después de la aplicación del fertilizante cuando los valores de CRM son positivos. Este hecho, también observado por Kipyego (1995), se debe a la baja solubilidad del fertilizante utilizado, nitrato amónico, y a que el código LEACHM no considera las propiedades de solubilidad del fertilizante aplicado. Sin embargo, los resultados del modelo mejoran para las capas profundas y los valores simulados de la concentración presentan igual tendencia que las observaciones, indicando una ligera infraestimación para las capas a 450 y 600 mm.

	Capa (mm)	RMSE ¹	AE	EF	CRM
Suelo 1	150	1,23	3,142	0,304	0,564
	300	0,95	1,057	0,542	0,203
	450	1,11	-1,018	0,037	-0,322
	600	1,08	-0,56	0,164	-0,185
Suelo 2	150	0,81	3,277	0,647	0,308
	300	0,44	0,497	0,858	0,046
	450	0,34	2	0,91	0,159
	600	0,60	-2,272	0,765	-0,261

1:error cuadrático medio (RMSE); 2: error medio (AE), 3: eficiencia de la modelización (EF); 4: media de las desviaciones entre valores medidos y simulados (CRM).

Tabla 4: Estadísticos correspondientes al contenido de nitrógeno en las diferentes capas para un tratamiento de 100 kg N/ha en los dos tipos de suelo

Table 4. Statistics of nitrogen content distribution for the two soils and 100 kg N/ha of application dose

	Capa(mm)	RMSE ¹	AE ²	EF ³	CRM ⁴
Suelo 1	150	1,03	4,667	0,471	0,4
	300	0,78	1,855	0,647	0,188
	450	0,84	3,42	0,678	0,319
	600	0,57	0,522	0,833	0,072
Suelo 2	150	0,69	-1,218	0,742	-0,114
	300	0,40	-3,028	0,884	-0,278
	450	0,40	-2,517	0,877	-0,2
	600	0,92	-7,835	0,215	-0,901

1:error cuadrático medio (RMSE); 2: error medio (AE), 3: eficiencia de la modelización (EF); 4: media de las desviaciones entre valores medidos y simulados (CRM).

Tabla 5. Estadísticos correspondientes al contenido de nitrógeno en las diferentes capas para una aplicación de 200 kg N/ha en los dos tipos de suelo

Table 5. Statistics of nitrogen content distribution for the two soils and 200 kg N/ha of application dose

La comparación de los resultados de N-NO₃ a partir de los criterios estadísticos establecidos y reflejados en las tablas 4 y 5, indica que la simulación es mejor para el suelo 2, como se puede apreciar por los valores de EF que tienden a 1. La sobreestimación de los perfiles de concentración se debería a la existencia de circulación preferencial en los laterales de las columnas. De hecho, el agua de drenaje rápido presenta una concentración diferente a la almacenada en los poros del suelo.

La cantidad de nitrógeno recuperado en el agua drenada para los dos suelos y correspondiente a los niveles de tratamiento de 0, 100 y 200 kg N/ha se muestra en las Fig. 5 y 6. Durante el período simulado, las cantidades lixiviadas han sido 23, 118 y 215 kg N/ha para el suelo 1 y de 157, 228 y 340 kg N/ha para el suelo 2. Los valores estimados exceden ligeramente a los valores medidos en el suelo 1 en un 17%, 5% y 0% respectivamente (19, 112 y 215 kg N/ha). El suelo 2 se comporta de forma diferente y las cantidades estimadas son inferiores a las medidas en un 12%, 9% y 10% respectivamente (177, 249 y 376 kg N/ha). La variación entre los dos tipos de suelo se justifica por la existencia de arcilla en el suelo 2. Se debe men-

cionar que en los tres tratamientos se produce un aumento rápido del nitrógeno lixiviado inmediatamente después de la aplicación del riego. El ligero enriquecimiento observado se debe a la mineralización en el suelo, dado que las dosis aplicadas se reflejan en el agua drenada entre 4 y 7 días después de su aplicación. Los estadísticos correspondientes a la cantidad de nitrógeno drenado en función del nitrógeno aplicado semanalmente se muestran en la Tabla 6. El error medio, AE, para el nitrógeno lixiviado varía entre 2,97 y -6,87 para el suelo 1 y entre -0,068 y -26,39 para el suelo 2. La variación observada en los dos tipos de suelo no puede deberse al fertilizante aplicado, sino a la heterogeneidad del suelo y en consecuencia, a la variabilidad espacial de los parámetros hidráulicos utilizados en la modelación.

El efecto de la dosis aplicada sobre el contenido de nitrógeno (N-NO₃) en el suelo es evidente. La cantidad de nitrato lixiviado en el perfil de suelo es proporcional al fertilizante aplicado y como cabría esperar presenta un comportamiento lineal, los resultados muestran que las concentraciones de nitrógeno son más elevadas en la columna de suelo donde se aplicaron 200 kg N/ha que en la de 100 kg N/ha. Las pérdidas

	Tratamientos	RMSE ¹	AE ²	EF ³	CRM ⁴
Suelo1	0	51,46	-0,068	0,075	-0,013
	100	35,84	-13,51	0,873	-0,335
	200	39,12	-26,39	0,850	-0,357
Suelo 2	0	41,24	2,97	0,844	0,104
	100	11,74	-1,95	0,990	-0,057
	200	30,37	-6,87	0,900	-0,149

1:error cuadrático medio (RMSE); 2: error medio (AE), 3: eficiencia de la modelización (EF); 4: media de las desviaciones entre valores medidos y simulados (CRM).

Tabla 6. Estadísticos correspondientes al contenido de nitrógeno drenado según los diferentes tratamientos en los dos tipos de suelo

Table 6. Statistics of leached nitrogen and applied dose for the two soils

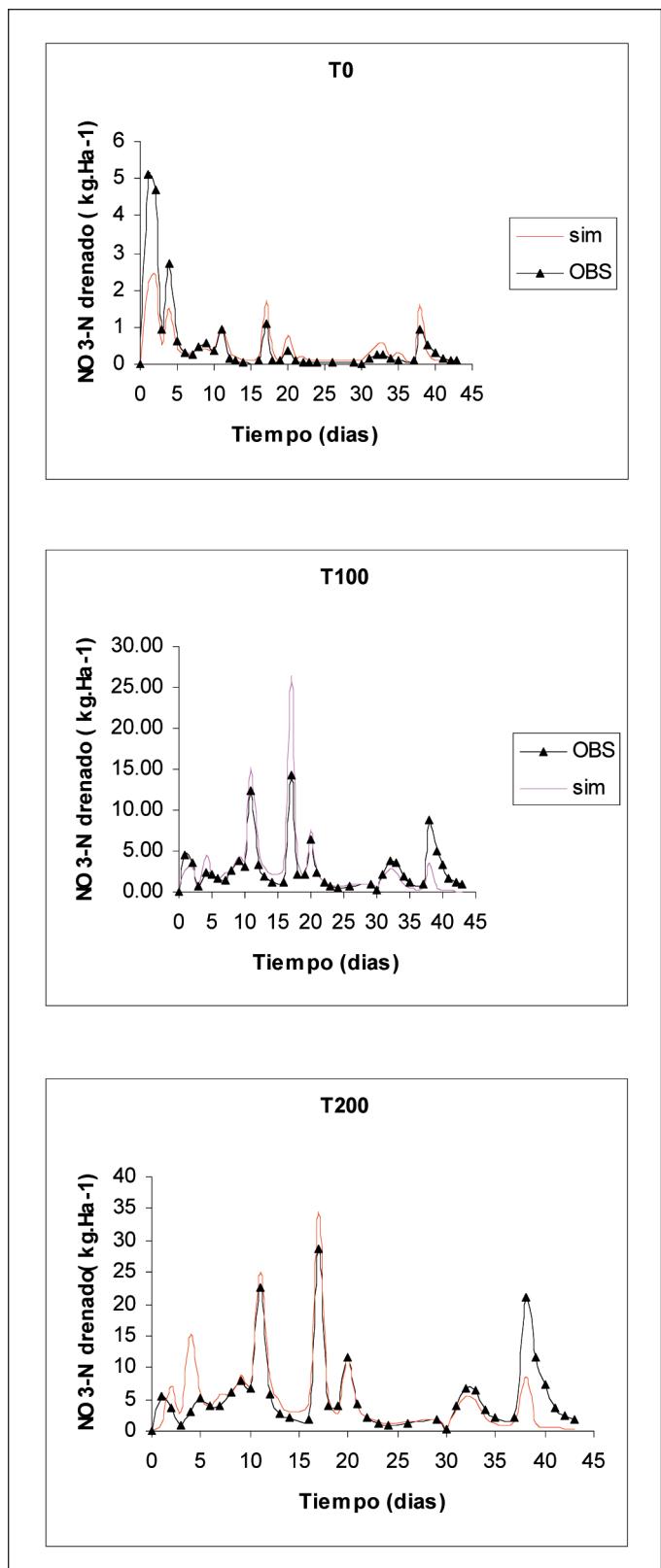


Figura 5. Comparación entre el nitrógeno medido y lixiviado para el suelo 1

Figure 5. Leached and simulated nitrogen for soil 1

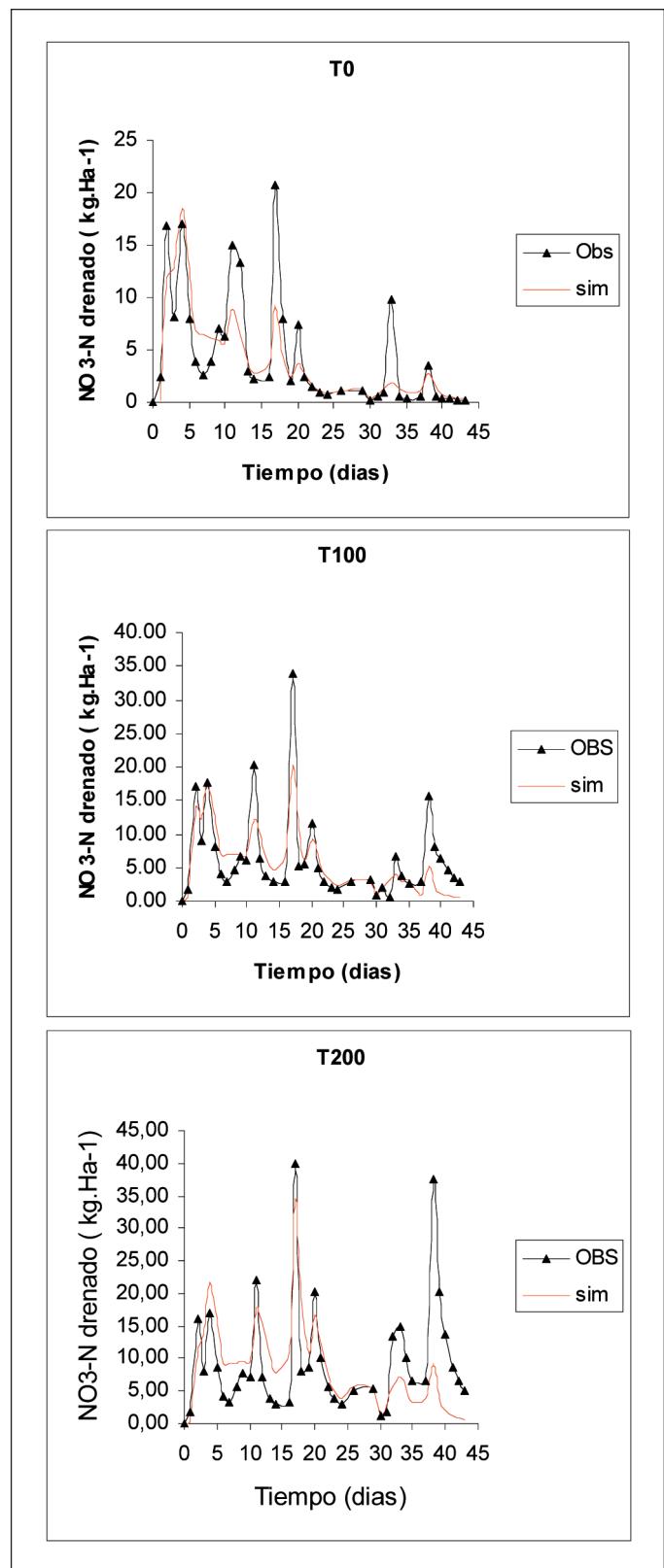


Figura 6. Comparación entre el nitrógeno medido y lixiviado para el suelo 2

Figure 6. Leached and simulated nitrogen for soil 2

potenciales por lixiviado también aumentan en función de la cantidad de nitrógeno aplicado, hecho también comprobado por Drury *et al.*, 1996 para un suelo sin cultivo.

Resultados del modelo: Efecto de la cantidad de nitrógeno aplicado

En la Fig. 4 se muestran los resultados simulados para las 5 dosis de nitrato amónico ($\text{NH}_4\text{-NO}_3$) aplicadas y comprendidas entre 0 y 400 kg N/ha. Se observa que el lixiviado es importante cuando la dosis de nitrógeno es elevada, y que la cantidad de nitrógeno aportada en la superficie del suelo sin cultivar se encuentra totalmente en las aguas drenadas, debido a las características granulométricas del suelo y la frecuencia de riego durante el periodo del ensayo. Así, el coeficiente de correlación obtenido para el suelo 1 es ligeramente mejor que para el del suelo 2 (0,9997 y 0,9966 respectivamente).

Conclusiones

Las simulaciones para las diferentes dosis aplicadas han mostrado que existe una relación lineal entre tasa de aporte y lixiviado de nitrato en los dos tipos de suelo analizados con un coeficiente de correlación de 0,9997 y 0,9966 para los suelos 1 y 2 respectivamente. Los resultados de la simulación para el nitrógeno lixiviado indican que el modelo sobrevalora los resultados para el suelo 1 y los infravalora para el suelo 2. La desviación observada puede explicarse por la existencia de una circulación preferencial en los suelos estudiados, no considerada en la ecuación EDA. Similares observaciones han sido mostradas por Kanwar *et al.*, (1985) y Ellsworth y Jury (1991).

El modelo ha puesto en evidencia que la fertilización en exceso en los suelos estudiados es rápidamente lixiviada hacia el nivel freático después de un episodio de lluvia o de riego. En la zona de M'nasra (Marruecos), el suelo presenta características similares al utilizado en este experimento, los agricultores tienen tendencia a exagerar el aporte de nitrógeno a las plantas durante los periodos de cultivo (encuesta realizada en 1999 por la CET de Marruecos a los agricultores de la zona), dada la naturaleza arenosa del suelo. En consecuencia, como cabría esperar el exceso de nitrógeno aplicado y no consumido por las plantas puede estar disponible para una circulación profunda en el suelo y su acumulación en las aguas subterráneas.

Agradecimientos

Este estudio forma parte del proyecto de colaboración España-Marruecos A/2744/05, financiado por la AECL.

Referencias

- Benbi D. K., Prihar S. and Cheema H. S. 1991. A model to predict changes in soil moisture, NO_3^- -N content and N uptake by wheat. *Fertilizer Research*, 28 (1), 73-84
- Bear, J. and Verruijt A. 1990. Modeling Groundwater Flow and Pollution. Dordrecht, The Netherlands: *D. Reidel Publishing company*. 130-137.
- Beven, K.J., Henderson D.E. and Reeves A.D. 1993. Dispersion parameters for undisturbed partially saturated soil. *Journal of Hydrology* 143: 19-43.
- Campbell G.S. 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Science*, 117 (6):311-314.
- Dorich, R. and Nelson, D.W. 1984. Evaluation of manual cadmium reduction methods for determination of nitrate in potassium chloride extracts of soil. *Soil sci. Soc. Am. J.* 48: 72-75.
- Drury, C.F., Tan, C.S., Gaynor, J.D., Oloya, T.O., and Welacky, T.W. 1996. Influence of controlled drainage-subirrigation on surface and tile drainage nitrate loss. *J. Environ. Qual.* 25, 317-324.
- Ellsworth, T.R. and Jury W.A. 1991. A three-dimensional field study of solute transport through unsaturated layered porous media. 2. Characterisation of vertical dispersion. *Water Resources Research* 27: 967-981.
- Follet, R. F. 1995. NLEAP model simulation of climate and management on N leaching for corn grown on sandy soil. *Journal of Contaminant Hydrology*, 20, 241-252
- Hutson, J.L. and Wagenet, R.J. 1992. LEACHM, Leaching Estimation And Chemistry Model, a process-based model of water and solute movement, transformations, plant uptake and chemical reactions in the unsaturated zone, version 3, *Research Series No. 92-3. Department of Soil, Crop and Atmospheric Sciences, Cornell University, NY, USA, September 1992*
- Izadi B., Ashraf M. S.; Studer D.; McCann I. and King B. 1996. A simple model for the prediction of nitrate concentration in the potato root zone. *Agricultural Water Management*, 30, 41-56
- Jabro, J.D., Stout W.L., Fales S.L., and Fox R.H. 1997. Nitrate leaching from soil core lysimeters treated with urine or feces under orchardgrass: Measurement and simulation. *J. Environ. Qual.* 26:89-94.
- Kanwar, R.S., Baker J.L. and J.M. Laflen J.M. 1985. Nitrate movement through the soil profile in relationship to tillage system and fertilizer application method. *Transactions of the ASAE* 28: 1802-1807.
- Kipyego Vincent A.S. 1995. *Effects of tillage and corn residues on nitrate-nitrogen and water movement through soil*. Thesis PhD, MacDonald campus of Mc Gill Univ. Quebec, Canada. 237 pp.

- Loague K., and Green R.E. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. *J. Contam. Hydrol.* 7:51-73
- Mehran M. and Tanji K.K. 1974. Computer modeling of nitrogen transformations in soils. *Journal Environmental Quality*, 3, 391-395.
- Moussaoui, A. 1994, Pollution nitrique actuelle et vulnérabilité de la nappe de M'nasra. Mémoire de 3^{ème} cycle IAV Hassan II. 250 pp.
- Saadi Z. and Maslouhi. A. 2003. Modeling Nitrogen Dynamics in the Unsaturated Soils for Evaluating the Nitrate Contamination of the Mnasra Groundwater. *Advances in Environmental Research*, 7 (4): 803-823.
- Saxton K. E., Schuman G.E. and Burwell R.E. 1977. Modelling nitrate movement and dissipation in fertilized soils. *Soil Science Society American Journal*, 41, 265-273.
- Selim, H. M. and Iskandar I.K. 1981. Modeling nitrogen transport and transformations in soils: 1.Theoretical considerations. *Soil Sci.* 131:233-241.
- Smith W.N., Reynolds W.D., De Jong R., Clemente R.S., and Topp E. 1995. Water flow through intact soil columns: Measurement and simulation using LEACHM. *J. Environ. Qual.* 24:874-881.
- SCET-MAROC 1999. Projet de protection de l'environnement du Bassin de Sebou (PPBS) : Etude pour un programme visant à minimiser et à contrôler l'impact des engrains et des pesticides sur l'environnement du bassin de sebou. Sous mission 2.1. Secretariat d'Etat Chargé de l'Environnement. 316 pp.
- Tillotson W.R. and Wagenet R.J. 1982. Simulation of fertilizer nitrogen under cropped situations. *Soil Science*, 133, 133-143.
- Watts D.C. and Hanks R.J. 1978. A soil nitrogen model for irrigated corn on sandy soils. *Soil Science Society American Journal*, 42, 492-499.
- Zéraouli, M. 1993. Pollution par les nitrates. Premiers résultats de la situation actuelle dans la nappe des Mnasra, ORMVAG, Département de Développement Agricole, Bureau Agropédolo.

Recibido: junio 2005

Aceptado: marzo 2007