

PARTE 2
SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA
XII CONGRESO CHILENO



Sociedad Chilena
de Ingeniería Hidráulica



Instituto Nacional
de Hidráulica - Chile

1

**SIMULACION DEL TRANSPORTE DE NITRATO A TRAVES
DE UN SUELO CULTIVADO**

CARLOS A. BONILLA M. (1)

JOSE F. MUÑOZ P. (2)

RESUMEN

En este trabajo se simula el transporte de nitratos por medio de un modelo hidrológico para ecosistemas agrícolas (OPUS).

El modelo es aplicado a un cultivo de maíz fertilizado a una razón de $260 \text{ kg-N} \cdot \text{ha}^{-1}$. Los resultados de la simulación son comparados con un ensayo de terreno, bajo las mismas condiciones.

La lixiviación de nitratos es calculada en ambas situaciones, como el transporte de nitratos más allá de la zona de alcance de las raíces. Considerando la escasa calibración que se realizó en esta prueba, el comportamiento del modelo resulta ser adecuado para describir el conjunto de fenómenos.

1 Ing. Agrónomo. Profesor Instructor, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Universidad Católica de Chile. Av. Vicuña Mackenna 4860. Santiago, Chile

2 Ing. Civil, Dr. Ing. Profesor Titular, Depto. De Ing. Hidráulica y Ambiental, Universidad Católica de Chile. Av. Vicuña Mackenna 4860. Santiago, Chile

INTRODUCCION

Durante estos últimos años se ha observado un creciente interés por determinar el impacto de la agricultura intensiva sobre la contaminación del agua subterránea (Persicani et al., 1995).

Así se ha demostrado, tanto en Chile como en el extranjero, la importancia que tiene la migración de nitratos sobre la contaminación difusa (Instituto de Ingenieros de Chile, 1990; Hall y Risser, 1993). Estudios realizados en Europa muestran que sólo el 50 a 70% del fertilizante aplicado es empleado por los cultivos, el resto es volatilizado, denitrificado o lixiviado.

La lixiviación de los nitratos es responsable de la contaminación del agua subterránea y está estrechamente ligada al tipo de cultivo, prácticas agrícolas y régimen de riego.

Bajo este marco, se han elaborado una serie de modelos matemáticos que permiten determinar la pérdida de nitratos más allá de la zona de las raíces y su comportamiento en el tiempo. Uno de los más recientes es OPUS (Smith, 1992), el cual recopila y mejora una serie de subrutinas de modelos anteriores y permite una amplia gama de posibilidades de simulación.

En este artículo, OPUS es empleado para simular el crecimiento de un cultivo de maíz, el movimiento del agua en el suelo, y el transporte y transformación del nitrógeno (N).

MATERIALES Y METODOS

Descripción del modelo

OPUS (Smith, 1992), es un modelo integrado de hidrología para ecosistemas agrícolas capaz de simular en conjunto el movimiento del agua sobre la superficie y dentro de la zona de alcance de las raíces, además de los procesos de transporte de sedimentos y productos químicos, evapotranspiración, ciclo del carbono y del nitrógeno, y sus interacciones con las labores agrícolas.

El modelo OPUS utiliza la ecuación de Richards (Richards, 1931) para describir el movimiento del agua en el suelo, que se puede expresar como:

$$C(\theta) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (K_u(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} + K_g(\theta)) \quad (1)$$

donde $C(\theta)$ es la capacidad capilar o pendiente de la curva humedad versus succión, θ es el contenido volumétrico de agua en el suelo, h es la altura de succión, t es el tiempo, z es la profundidad y $K(\theta)$ es la conductividad hidráulica del flujo difusivo (u) y gravitacional (g).

El flujo gravitacional es considerado positivo hacia abajo. Para el flujo difusivo, el valor de $K_u(\theta)$ se obtiene asumiendo que h varía uniformemente entre z_i y z_{i+1} . Así, mientras $\partial h/\partial z$ es uniforme

entre dos nodos y continuo dentro de un horizonte dado, $\partial\theta/\partial z$ puede ser discontinuo entre los nodos i e $i+1$.

La temperatura media diaria del suelo, a cada profundidad, se estima mediante un modelo de transferencia de calor. El cálculo considera convección y difusión. La difusión de calor es descrita como:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = DT(\rho, \theta) \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2)$$

donde T es la temperatura, t es el tiempo y z la profundidad, DT es la difusividad térmica, ρ es la densidad del suelo y θ su contenido de agua.

El calor convectivo para un volumen de control de suelo se estima como:

$$\gamma_w \cdot (T_e \cdot q_e - T_o \cdot q_o) = \frac{d}{dt} (\gamma_w \cdot V_w + \gamma_s \cdot V_s) \cdot T_o \quad (3)$$

donde T es la temperatura del agua, γ es la capacidad calórica, V es el volumen comprometido y q el flujo hídrico. Los subíndices w y s se emplean para señalar características del agua y del suelo respectivamente y los subíndices e y o para las condiciones de entrada y salida.

Estos cambios son tratados de manera similar al movimiento del agua, con redistribución térmica entre tormentas.

El movimiento de productos químicos absorbidos es simulado por un modelo de transporte convectivo operando en paralelo con el modelo de movimiento del agua. La absorción del soluto se estima en función de una absorción de equilibrio, o una absorción cinética.

La absorción de equilibrio asume una razón única entre el soluto absorbido en los sólidos del suelo y el soluto en solución. La razón de equilibrio es denominada K_d y se expresa como:

$$K_d = \frac{C_a}{C_w} = \frac{\text{Concentración absorbida}}{\text{Concentración absorbida}} \quad (4)$$

La razón de equilibrio K_d es directamente proporcional al contenido local de carbono orgánico (f_b) y se expresa como $K_d = f_b \cdot K_{oc}$ siendo K_{oc} la constante de adsorción.

El suponer una adsorción cinética define una tasa de transferencia entre la fase disuelta y la fase adsorbida proporcional a la diferencia entre la razón existente y la razón de equilibrio. Expresando la transferencia como el cambio en la concentración del material adsorbido (Ca) por unidad de tiempo, el supuesto cinético calcula esta tasa como:

$$\frac{dCa}{dt} = v \cdot (C_w \cdot K_d - Ca) \quad (5)$$

donde v es un coeficiente de tasa.

El ciclo del nitrógeno se simula en base a una adaptación del modelo de descomposición de residuos orgánicos CENTURY (Parton et al., 1988). El residuo vegetal es caracterizado por el cociente entre el contenido de nitrógeno y el contenido de carbono (C/Nc). La descomposición es acompañada por una mineralización y una inmovilización de acuerdo a la razón Cc/Nc del material fuente y del grupo receptor.

La descomposición de la materia orgánica es calculada como:

$$\frac{dC_c}{dt} = k \cdot f_w \cdot f_t \cdot C_c \quad (6)$$

donde C_c es el contenido de carbono, t es el tiempo, k es la tasa máxima de descomposición y los coeficientes f_w y f_t son los efectos del contenido de agua y de la temperatura, respectivamente.

El nitrógeno se puede adicionar al sistema como nitrógeno mineral en el fertilizante, como residuo vegetal, o por medio de la fijación biológica.

La nitrificación, que transforma el $N-NH_4$ en $N-NO_3$, ocurre en forma continua en respuesta al contenido de agua, a la temperatura y a la concentración de NH_4 en el suelo.

La escasez de oxígeno, que se asocia a altos contenidos de agua en el suelo, hace que el NO_3 mineral se volatilice, en un proceso llamado denitrificación (mD), el cual se estima como:

$$mD = a \cdot f_w \cdot f_t \cdot f_{SN} \cdot NO_3 \quad (7)$$

donde los coeficientes f_w y f_t son los mismos de la nitrificación, f_{SN} es una función de la textura, NO_3 es la concentración de nitrato y a es una constante.

El crecimiento del cultivo (p), es calculado en base a materia seca como:

$$p = c_c \cdot f_c \cdot f_a \cdot f_m \cdot \tau \cdot R_i \cdot t \quad (8)$$

donde c_c es el coeficiente de conversión fotosintética y f_c es la eficiencia de conversión, f_a , f_m y τ son coeficientes de la edad, del tamaño y del estrés de la planta, respectivamente, R_i es la radiación solar diaria y t es el período de tiempo considerado.

DESCRIPCION DEL ENSAYO DE CAMPO

Se emplearon los resultados de un experimento de terreno desarrollado durante los años 1991-1992 (Kengni, 1993), cuyo objetivo fue determinar un esquema de fertilización óptimo para un cultivo de maíz (*Zea mays* L.). Los componentes del balance hídrico (consumo, drenaje, almacenamiento en el suelo) y del ciclo del nitrógeno (mineralización, asimilación, y lixiviación) se obtuvieron por medio de un monitoreo intensivo hasta 0,8 m de profundidad, luego de haber realizado una fertilización con 260 kg-N ha⁻¹, bajo la forma de nitrato de amonio (NH₄NO₃).

El suelo corresponde a una terraza glacial, de aproximadamente 1 m de espesor que descansa sobre una capa de 10 a 20 m de grava de alta permeabilidad. Sus principales características se indican en la Tabla 1. La profundidad de la napa oscila entre los 9 y 15 m.

Una batería de tensiómetros, cápsulas de succión y tubos de acceso de neutrones permitieron determinar la variación del contenido de agua y de nitrógeno del perfil en el tiempo.

Se registró la precipitación, temperatura, evaporación, y humedad, por medio de una estación meteorológica.

Tabla 1. Análisis físico-químico del suelo (Kengni, 1993).

	Horizonte (cm)		
	0-30	30-60	60-90
Arcilla	15,8	18,3	15,8
Limo fino	22,8	22,8	18,6
Limo grueso	17,3	15,1	9,1
Arenafina	17,7	16,4	16,6
Arenagruosa	26,4	27,5	40,0
Materia orgánica	2,3	1,5	0,7
C/N*	10,3	8,7	6,7
pH	7,0	7,0	7,0
Datos en %, *: carbono total en relación al nitrógeno orgánico.			

SIMULACION DEL EXPERIMENTO

La simulación del experimento se realizó en base al modelo OPUS, empleando los siguientes parámetros de entrada.

a) Propiedades del suelo

Las mediciones hechas en terreno relativas a las características del suelo fueron ingresadas como dato al modelo. Dada la ausencia de información sobre la conductividad hidráulica saturada de cada horizonte, se permitió que el modelo estimara el valor de ella en función de la porosidad del suelo, y del contenido de arena, limo y arcilla.

b) Crecimiento de la planta

Para representar el crecimiento de la planta en el modelo, se ajustaron algunos parámetros. Entre ellos la temperatura óptima de crecimiento, la producción potencial de materia seca, y el rendimiento potencial.

c) Labores de campo

Las actividades de monitoreo se iniciaron el día 15 de abril de 1991, al que en términos relativos se le asignó el día inicial en la simulación (día 0). La siembra y aplicación del fertilizante se realizaron el día 22 de abril (día 7), la cosecha el 24 de octubre (día 192), en la cual se removió todo el material existente sobre el suelo, y así se conservó hasta el día 12 de febrero de 1992 (día 303), en el cual se dio por terminado en ensayo y la simulación.

Durante la temporada se realizaron seis riegos, cada uno aplicando en promedio una lámina de 40 mm, los días 51, 90, 99, 120 y 143, en términos relativos.

RESULTADOS Y DISCUSION

Balance hídrico

El balance hídrico fue calculado por medio de la ecuación de conservación de la masa:

$$\Delta S = P - R - ET \quad (9)$$

donde ΔS es el cambio en el almacenamiento en la zona de las raíces, P es la cantidad de agua aportada en forma de lluvia o riego, R es la percolación más allá del alcance de las raíces, y ET es la evapotranspiración real durante el intervalo de tiempo. El escurrimiento superficial no se consideró, ya que fue prácticamente nulo dada la permeabilidad del terreno. La comparación entre las observaciones en terreno y la simulación se puede ver en la Tabla 2.

Tabla 2. Balance hídrico.

	Observado (mm)	Simulado (mm)
Precipitación + riego	861,1	861,1
Drenaje	356,7	378,3
Evapotranspiración	489,0	467,9
Cambio en el almacenamiento	15,4	14,9

Dado que el riego y las precipitaciones fueron datos ingresados al modelo, la cantidad de agua aplicada en la simulación fue exactamente la misma que se observó en el experimento.

Se consideró como agua percolada aquella que infiltró más allá de los 80 cm de profundidad (alcance de las raíces). Se observó un buen ajuste entre las mediciones de terreno y el comportamiento del modelo en el tiempo, tal como se ve en la Figura 1.

En la misma figura se puede observar que el drenaje ocurre esencialmente antes de la emergencia de la planta, o al final del ciclo, cuando su actividad fisiológica ha cesado, y obviamente después de la cosecha, cuando se incrementan las precipitaciones. Es importante observar que durante el período de cultivo, las pérdidas por drenaje fueron mínimas.

En términos de evapotranspiración, se observó una buena correspondencia a lo largo del tiempo entre el modelo y el ensayo, tal como se muestra en la Figura 2.

La evapotranspiración acumulada fue de 489,0 mm en el ensayo y de 467,9 mm en la simulación.

DESARROLLO DEL CULTIVO

En la Tabla 3 se muestra el resultado de la simulación para el crecimiento del cultivo en la temporada 1991-1992. La edad de la planta es definida en grados día, que representan un grado de temperatura media diaria por encima de la temperatura mínima de crecimiento. Aun cuando estructuralmente OPUS no es un programa diseñado para predecir el crecimiento de los cultivos, no resultó difícil reproducir el comportamiento observado en terreno.

Tabla 3. Resumen de los resultados para la simulación del crecimiento del cultivo.

	Observado	Simulado
Total de grados día	1482,0	1482,7
Rendimiento (ton/ha)	13,1	13,1

DINAMICA DEL NITROGENO

En la Figura 3 se muestran la concentración de nitratos calculadas por el modelo y las medidas en el experimento a una profundidad de 80 cm, límite del alcance de las raíces.

Se observa un ajuste adecuado entre ambas curvas, produciéndose un desfase a partir del día 200.

Para el cálculo de la lixiviación se empleó la concentración de nitrato de la última estrata (60-90 cm), la cual se multiplicó por la percolación local, obteniendo una pérdida de nitratos en kg ha⁻¹. Este análisis se muestra en la Tabla 4, y a lo largo del tiempo, en la Figura 4.

Se observa una correspondencia bastante estrecha entre ambas curvas hasta el día 250. A partir de esa fecha, el modelo pudo haber empleado una tasa de nitrificación muy distinta a la observada en terreno. La estimación de estas tasas es un aspecto que aun concita el interés de numerosos investigadores (Francis, et al. 1993, Reynolds, et al. 1994). Cabe la posibilidad de que al final de la temporada los datos de terreno no sean una estimación representativa de la concentración de N en el perfil, debido a la disminución en la frecuencia de muestreo, y a una gran variabilidad en los niveles de nitrato observados en el perfil.

Aun así, las diferencias entre los valores observados y los simulados son pequeñas si se considera la cantidad de nitrógeno adicionada al sistema y la escasa presencia de NH₄ en el perfil.

Tabla 4. Nitrógeno transportado más allá de la profundidad de las raíces.

	Observada	Simulada
Pérdida de nitrato (kg ha ⁻¹)	753,6	653,1

CONCLUSIONES

No resultó difícil para OPUS simular el comportamiento del cultivo. Aun cuando no se dispuso de datos sobre la conductividad hidráulica del terreno, los componentes del balance hídrico mostraron un ajuste bastante cercano a las mediciones de campo. La simulación de las transformaciones del nitrógeno y respuestas a la fertilización muestran un ajuste satisfactorio en relación a las mediciones realizadas en terreno. Considerando la escasa calibración que se realizó en esta prueba, el comportamiento del modelo resulta ser adecuado para describir el conjunto de fenómenos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al profesor Roger E. Smith de Colorado State University, Fort Collins, EEUU., por el suministro del programa computacional, y al Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement de la Universidad Joseph Fourier, de Grenoble, Francia, por las mediciones en terreno.

BIBLIOGRAFIA

- 1) FRANCIS, D., DORAN, J. Y LOHRY R. (1993). Immobilization and uptake of nitrogen applied to corn as starter fertilizer. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:1023-1026.
- 2) Hall, D., y Risser D. (1993). Effects of agricultural nutrient management on nitrogen fate and transport in Lancaster County, Pennsylvania. *Water Resources Bulletin* 29(1):55-76.
- 3) Instituto de Ingenieros de Chile. (1990). Contaminación en Chile. Informe Gerencial. Coordinado por: Aidis, Sociedad Académica del Instituto de Ingenieros, Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.
- 4) Kengni, L. (1993). Mesure in-situ des pertes d'eau et d'azote sous culture de maïs irriguée. Application à la Plaine de la Bièvre (Isère). Docteur These, Université Joseph Fourier-Grenoble, Francia.
- 5) Parton, W., Stewart J. y Cole C. (1988). Dynamics of C, N, P y S in grassland soil: A model. *Biogeochemistry* 5:109-131.
- 6) Persicani, D., Gasparetti G., Siro P. y Bonvini M. (1995). Measurement and simulation of atrazine and alachlor leaching into two field soil. *Journal of Contaminant Hydrology* 19:127-144.
- 7) REYNOLDS, J., RICHTER D. y BORNEMISZA E. (1994). Environmental impacts of nitrification and nitrate adsorption in fertilized andisols in the Valle Central of Costa Rica. *Soil*

Science 157(5):289-299.

8) Richards, L. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. Physics 1:318-333.

9) Smith, R. (1992). Opus: An integrated simulation model for transport of nonpoint-source pollutants at field scale. Vol I, Documentation. . USDA-ARS ARS-98, 120 pp.

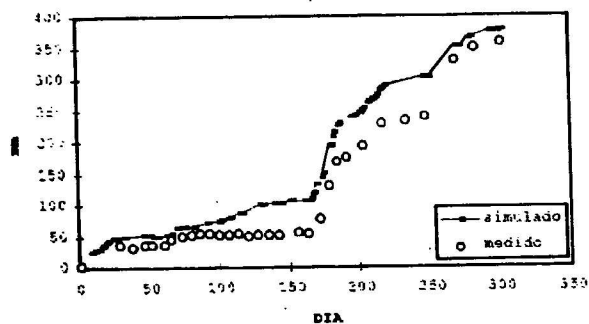


Figura 1. Percolación acumulada en el tiempo más allá de los 80 cm de profundidad.

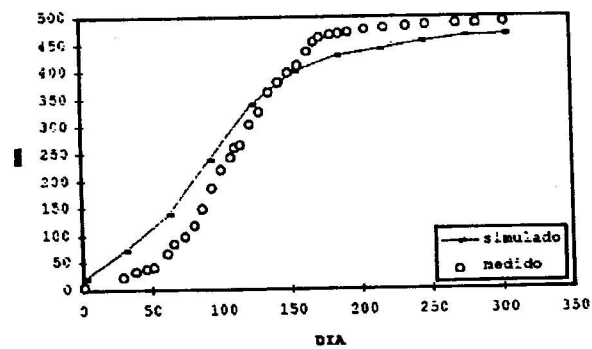


Figura 2. Evapotranspiración acumulada en el tiempo.

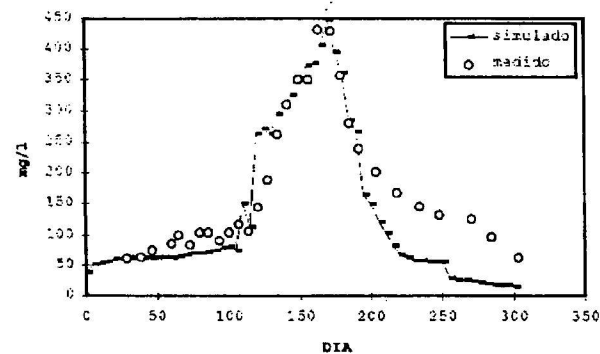


Figura 3. Concentración de nitrato a 0,8 m de profundidad.

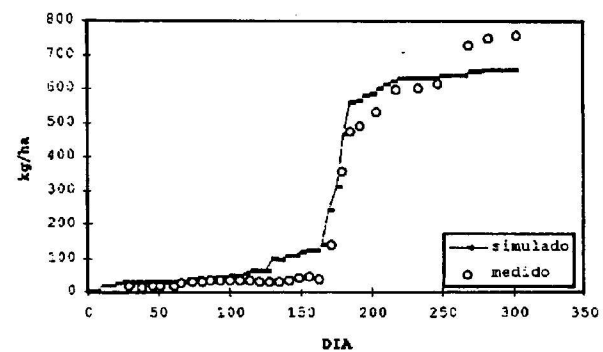


Figura 4. Pérdidas acumuladas de nitrato bajo las raíces del cultivo.