

**MODELACIÓN DEL IMPACTO DE PRÁCTICAS DE MANEJO AGRÍCOLA EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**JOSÉ LUIS ARUMÍ<sup>1</sup>  
DERREL L. MARTIN<sup>2</sup>  
DARRELL G. WATTS<sup>2</sup>**

**RESUMEN**

Se presenta una metodología para evaluar el impacto que cambios en las prácticas de riego y fertilización causan sobre la concentración de nitratos en el agua subterránea, y su disponibilidad.

La metodología que se presenta está basada en el uso de cuatro modelos de simulación, interconectados. Se utilizó el modelo EPIC para evaluar el efecto de las prácticas agrícolas de riego y fertilización sobre la percolación de agua y lixiviación de nitratos desde la zona radicular. Se usó un modelo para la zona vadosa, que permite calcular las tasas de recarga que llegan al acuífero, e integrarlas sobre el dominio espacial y temporal del modelo de aguas subterráneas. Un modelo de agua subterránea fue creado usando los códigos MODFLOW-MT3D para simular los flujos de agua y nitrato en un acuífero superficial ubicado, bajo el área donde se centró el estudio

Se aplicó la metodología evaluando el impacto que buenas prácticas de manejo tienen sobre el acuífero en estudio. Para ello se realizaron dos experimentos de simulación: El primero consistió en utilizar un algoritmo de rastreo de partículas para determinar la edad del agua que es bombeada desde un pozo ubicado en un predio de control. El segundo experimento consistió en determinar la reducción de concentración de nitrato-nitrógeno en el acuífero, tras 10 años de buenas prácticas de riego y fertilización localizadas en dicho predio. Los resultados indicaron que transcurrido este período, las mejoras en la calidad del agua subterránea sólo se producen en la parte superficial del acuífero.

<sup>1</sup> Profesor Asistente, Departamento de Riego y Drenaje, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción

<sup>2</sup> Ph. D., Professor, Department of Biological Systems Engineering, Institute of Agriculture and Natural Resources, University of Nebraska-Lincoln, U.S.A.



Figura 10. Flujo de cobre diario, observado y calculado.

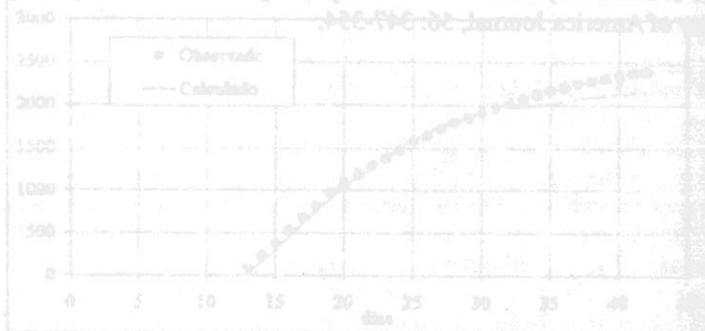


Figura 11. Masa total de cobre recuperado en el tiempo.

La modelación del flujo con el programa Hydrus 2D presentó resultados satisfactorios en el caudal efluente diario como en el volumen acumulado, convirtiéndolo en una herramienta útil y confiable para la modelación del flujo en pilas de lixiviación en condiciones reales y con relave de cobre aglomerado. Los resultados de la modelación del transporte de cobre fueron más erráticos, aunque los del flujo másico de cobre diario y acumulado mostraron un comportamiento aceptable, por lo menos en las primeras etapas de la lixiviación. Se debe continuar con la investigación, tanto en el ámbito experimental como en el teórico, para generar herramientas, que hoy no existen, que puedan ser utilizadas en el diseño y operación de este tipo de procesos industriales.

**REFERENCIAS**

Bear, L. 1972. Dynamics of Fluids in Porous Media. American Elsevier, New York.

Codelco-Chile. 28 de Agosto de 2001. <http://www.codelco.cl/corporacion/>

Ortiz, C. 2000. Modificación de los Parámetros de Flujo y Transporte de Sólidos en la Lixiviación en Aglomerados de Relave de Cobre. Tesis de Magister P.U.C.

Richards, L.A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous media. *Physics* 1:318-333.

## 1. PRESENTACIÓN

En la zona central de los Estados Unidos de América, los depósitos de aguas subterráneas constituyen la principal reserva del recurso hídrico. Debido al intensivo uso de químicos en la agricultura, estos depósitos se encuentran amenazados, en el mejor de los casos, o simplemente altamente contaminados. En el Estado de Nebraska, la contaminación del agua subterránea por nitratos es considerada como uno de los problemas prioritarios a afrontar por el Gobierno Estatal y Federal. Por esta razón, muchas organizaciones reguladoras se encuentran desarrollando programas para proteger los acuíferos mediante el empleo de mejores prácticas de manejo agrícola, especialmente en lo que se refiere a riego y fertilización.

Este trabajo presenta el desarrollo de una metodología para evaluar el impacto en los sistemas de aguas subterráneas provocados por cambios en las prácticas de agrícolas de riego y fertilización. Esta investigación fue realizada en el marco del proyecto "Management Systems Evaluation Area (MSEA) Research Project". Desarrollado en el Estado de Nebraska, EEUU. El objetivo general del Proyecto MSEA es el desarrollo de herramientas que permitan estudiar el efecto de nuevas prácticas de manejo en riego y fertilización, recomendadas por la autoridad correspondiente, en la concentración de nitratos en el agua subterránea, y el volumen almacenado en los acuíferos. El área de estudio del proyecto fue la vecindad de la estación experimental del Proyecto MSEA, localizada en el Valle Central del Río Platte, en el Estado de Nebraska (figura 1).

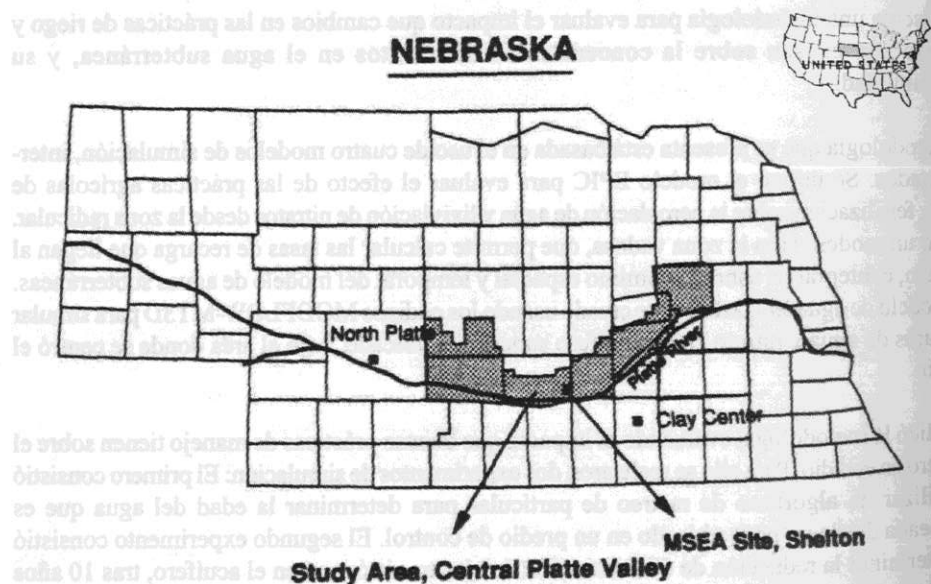


Figura 1. Ubicación del área donde se desarrolla el proyecto MSEA.

## 2. METODOLOGÍA

Debido a que medir directamente el efecto que el cambio de prácticas de manejo agrícola tiene sobre los depósitos de agua subterránea es muy caro, difícil y lento, la modelación se ha usado intensivamente para predecir estos impactos. Es por este motivo que la literatura abunda en trabajos sobre modelación de la lixiviación de nitratos (tanto a escala puntual como predial), transporte de solutos en agua subterránea, captura de contaminantes desde pozos, etc.

Un problema importante para la modelación de sistemas de aguas subterráneas es cómo hacer una buena estimación de la recarga de agua y contaminante a los acuíferos. Muchos de los modelos desarrollados no poseen una conexión definida entre lo que ocurre en la superficie y las aguas subterráneas. El transporte de agua y nutrientes a través de la zona vadosa es frecuentemente despreciado o sobre-simplificado. Lo anterior ocurre a pesar de que es sabido que la dinámica de la respuesta del sistema de aguas subterráneas depende del tiempo de residencia del agua y los nutrientes en la zona vadosa, el cual, según el tipo de suelo, puede ser de meses o incluso años.

La evaluación de prácticas de manejo se realiza normalmente con modelos agrícolas que predicen valores de rendimiento de cultivos, percolación profunda y lixiviación de nutrientes desde la zona radicular. Estos modelos se aplican sobre un dominio definido por áreas agrícolas que tienen características homogéneas tanto de suelos como de cultivos, riego y fertilización. En cambio, los modelos de aguas subterráneas simulan el comportamiento del acuífero a escala regional. La diferencia en los tamaños de los dominios de ambos tipos de modelos dificulta su conexión, y hace necesaria una integración espacial y temporal de los resultados de ambos modelos.

La metodología que se presenta en este documento aborda el problema anteriormente señalado al interconectar cuatro modelos diferentes de la forma indicada en la figura 2 (Arumí, 2000). El primer modelo corresponde a un modelo agrícola que simula el balance de agua y nitrógeno en la planta, permitiendo estimar rendimientos agrícolas, percolaciones de agua y lixiviación de nitratos. El segundo modelo permite analizar el transporte de agua y soluto en la zona vadosa. El tercer modelo corresponde a un modelo regional de aguas subterráneas (en este caso MODFLOW) y el cuarto modelo es un modelo de transporte de solutos en medio saturados (en este caso MT3D).

## 3. MODELO AGRÍCOLA

Para evaluar el efecto de las prácticas de riego y fertilización sobre la percolación de agua y lixiviación de nitratos desde la zona radicular, se utilizó el modelo "Environmental Policy Integrated Calculator" EPIC, desarrollado por el servicio agrícola de los Estados Unidos de América (Williams et al. 1984). La elección se basó en que EPIC había sido calibrado para la zona en estudio por Bredeweg (1994). Para efectos de modelación, se definieron unidades homogéneas de manejo basadas en similares características de suelos, cultivos y prácticas de riego. Para cada una de estas unidades de manejo se estimó la percolación de agua y la lixiviación de nitrato-nitrógeno.

Para desarrollar la modelación, se definieron unidades de manejo homogéneas, basadas en el tipo de suelo, cultivo y método de riego. Información sobre los tipos de suelo fue obtenida de las



bases de datos de la Comisión de Recursos Naturales del Estado de Nebraska. Para determinar los cultivos y las prácticas de riego se realizó un catastro en terreno. En ese catastro fue posible confirmar que en el área del Valle central de Río Platte existen tres zonas bien marcadas: la parte alta, el Valle y la zona inundable por el Río Platte. En la Tabla N° 1 se presentan las familias de suelo existentes en la zona del estudio. En la Tabla N° 2 se presenta un resumen de los tipos de riego y cultivos encontrados en cada zona.

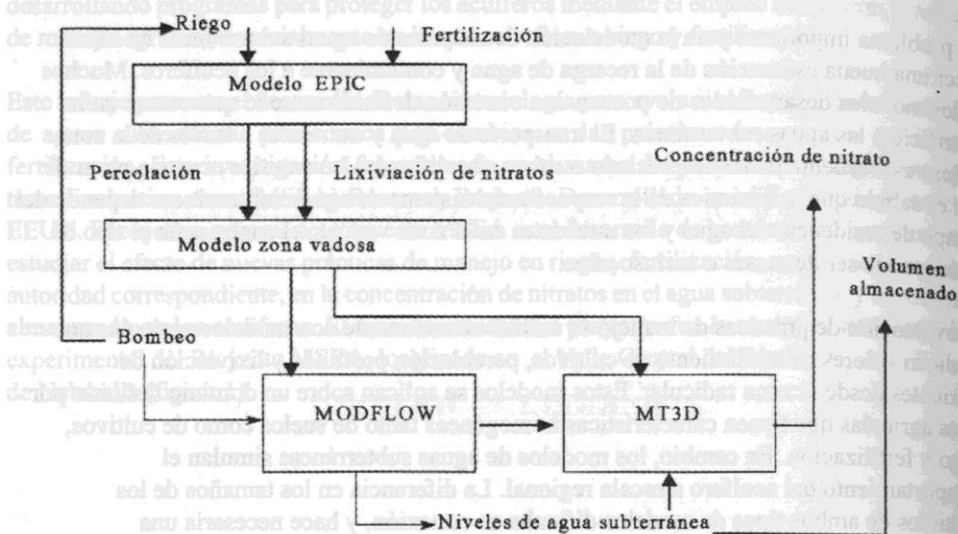


Figura 2. Esquema conceptual de la metodología

Tabla 1. Familias de suelo existentes en el área de estudio.

Familia de suelos	Nombre	Textura	Pendiente
Gibbon-Leshara-Akta	Gibbon	Franco limoso	Plano
Platte	Platte	Franco arenoso	Plano
Holdrege-Hall-Cozal	Hord	Franco limoso	Plano
Coly-Uly-Holdrege	Coly	Franco limoso	Suave a fuerte
Blendon-Thurman-Valentic	Blendon	Franco arenoso	Plano
Wood River	Wood River	Limo arcilloso	Plano

Para la etapa de calibración del modelo, se definieron 27 unidades de manejo homogéneas. En cada una de ellas, se simuló las prácticas de manejo agrícola utilizadas, determinando valores mensuales de percolación de agua y lixiviación de nitratos que escapan de la zona radicular y que alimentan el modelo de la zona vadosa.

Figura 1. Ubicación del área donde se desarrolla el proyecto

Tabla 2. Tipos de riego y cultivos encontrados en cada zona.

Zona	Suelo	Cultivo	Riego	% área
Alta	Coly	Pasto	-	80.0
		Otros		20.0
Valle	Hord Wood Blendon Gibbon	Maíz	Pivote	17.0
			Surco	68.0
		Soya	Secano	0.5
			Pivote	0.5
			Surco	5.0
		Alfalfa	Secano	0.5
			Pivote	0.1
			Surco	2.5
		Otros	Secano	1.0
		Otros		4.9
Baja	Platte	Pasto	Secano	20.0
		Humedales	Secano	65.0
		Otros		15.0

#### 4. MODELO DE LA ZONA VADOSA

En el área de estudio, la zona vadosa tiene un espesor que varía desde 2 a 10 metros. En general, está constituida por dos horizontes característicos: Un relleno reciente que conforma el suelo superficial, normalmente de texturas limosa a arenosas finas. El segundo horizonte lo constituye el acuífero en sí, con una textura arena-gravosa. El tiempo de residencia de la recarga en la zona vadosa varía desde 2 meses, en la zona cercana al río Platte, a 2 años en el área al norte del Río Wood.

Para evaluar el efecto de la zona vadosa en la recarga del agua subterránea, se utilizó un modelo basado en el uso de la técnica de descomposición para producir una solución aproximada de la ecuación de Richards (Arumí et al. 2001). Este modelo es un algoritmo relativamente simple y rápido de procesar, que permite la integración, sobre una región geográficamente extensa, de los resultados de simulaciones realizadas con el modelo agrícola (en este caso EPIC), conectándolo con el modelo regional de aguas subterráneas (MODFLOW - MT3D). De esa forma el modelo permite calcular las tasas de recarga que llegan al acuífero, e integrarlas sobre el dominio espacial y temporal del modelo de agua subterráneas (que no coincide con las unidades homogéneas definidas para el modelo EPIC).

#### 5. MODELO HIDROGEOLÓGICO

Se elaboró un modelo hidrogeológico para simular el comportamiento del acuífero ubicado inmediatamente bajo el área de estudio. Este es un acuífero libre, formado por sedimentos recientes del río Platte, y que tiene un espesor medio de 15 metros (Diffendal and Smith, 1996; McGuire and Kilpatrick, 1998). El acuífero es explotado para riego a través de un gran número de pozos (1140 pozos inscritos en 1996 en el área en estudio), que en general capturan el agua entre los 10 y 15 metros de profundidad. Las tasas de bombeo utilizadas para el modelo fueron estimadas basándose en las tasas de riego.

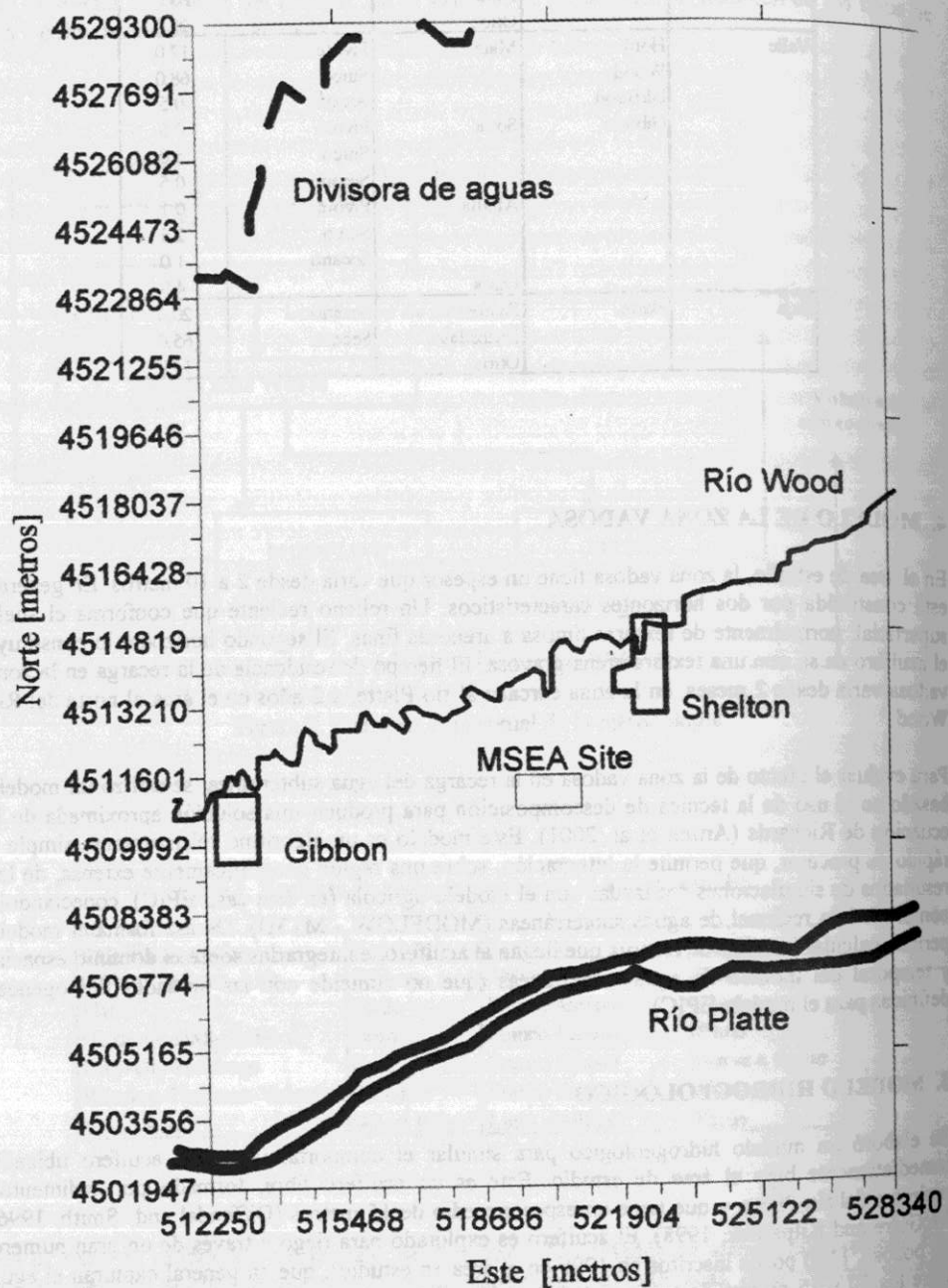


Figura 3. Área considerada para el modelo de agua subterránea.

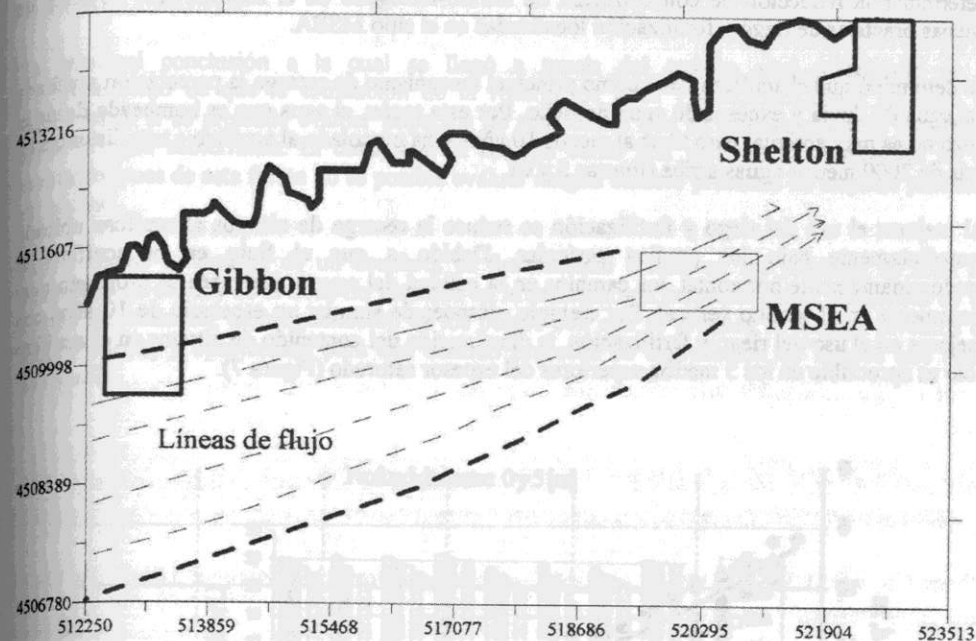


Figura 4. Zona aportante al área del Sitio MSEA, considerada para el estudio de transporte de nitratos.

El modelo numérico de aguas subterráneas fue creado usando los códigos MODFLOW-MT3D para simular el escurrimiento de agua y nitrato en un acuífero superficial ubicado bajo el área donde se centró el estudio del proyecto MSEA. En la figura 3, se presenta el área de estudio considerada para la aplicación de MODFLOW (440 km<sup>2</sup>). En la figura 4, se presenta el área considerada para el estudio de transporte de nitratos usando MT3D (90 km<sup>2</sup>). La mayor extensión del área considerada en MODFLOW se debe a que fue necesario aprovechar las condiciones de borde existentes para el modelo hidrogeológico.

El modelo de aguas subterráneas fue calibrado con datos históricos medidos en 1986, 1991 y 1996. Con la excepción de variaciones locales producidas durante la temporada de riego y durante años extremos (como 1993), el comportamiento del nivel freático a escala regional es muy estable. Debido al relativo bajo espesor y alta conductividad del acuífero, y a la gran influencia del Río Platte sobre el sistema hidrogeológico, el modelo numérico resulta poco sensible a variaciones de la conductividad hidráulica del acuífero entre 50 y 150 m/día.

## 6. APLICACIÓN

Durante la ejecución del proyecto MSEA hubo un esfuerzo en demostrar que era posible utilizar buenas prácticas de riego y fertilización, destinadas a reducir la lixiviación de nitratos, sin reducción de rendimientos de los cultivos. Sin embargo, el efecto de la aplicación de estas buenas prácticas en el acuífero aún no es claro.

En el caso de Nebraska, los agricultores deben certificar anualmente la calidad del agua que utilizan para bombeo, lo que se considera además como un índice de la calidad de sus prácticas de manejo. Como el agua se capta desde una profundidad de 10 a 15 metros, surge la pregunta de qué tan representativa de la calidad del manejo del productor es dicha agua.

Lo anterior motivó a evaluar el impacto que buenas prácticas de manejo tienen sobre el acuífero en estudio. Para ello, se realizaron dos experimentos de simulación: El primero consistió en utilizar un algoritmo de rastreo de partículas para determinar la edad del agua que es bombeada desde un pozo ubicado en el sitio del proyecto MSEA. El segundo experimento consistió en



determinar la reducción de concentración de nitrato-nitrogeno en el acuífero tras 10 años de buenas prácticas de riego y fertilización localizadas en el sitio MSEA.

Se determinó que el acuífero tiene como principal mecanismo de recarga la percolación profunda del agua de lluvia y excesos de agua de riego. Por esta razón, el agua que es bombeada desde el pozo no es muy antigua, pero tiene al menos 10 años y ha percolado al acuífero a una distancia de más de 2000 metros aguas arriba (figuras 5 y 6).

Al mejorar el uso del riego y fertilización se reduce la recarga de nitratos al acuífero ubicado inmediatamente bajo los predios agrícolas. Debido a que el flujo en el acuífero es predominantemente horizontal, los cambios en la calidad del agua subterránea se propagan muy lentamente en el sentido vertical. Por ejemplo, después de simular un escenario de 10 años con mejoras en el uso del riego y fertilización, la disminución del contenido de nitratos en el acuífero sólo es apreciable en los 5 metros superiores del espesor saturado (Figura 7).

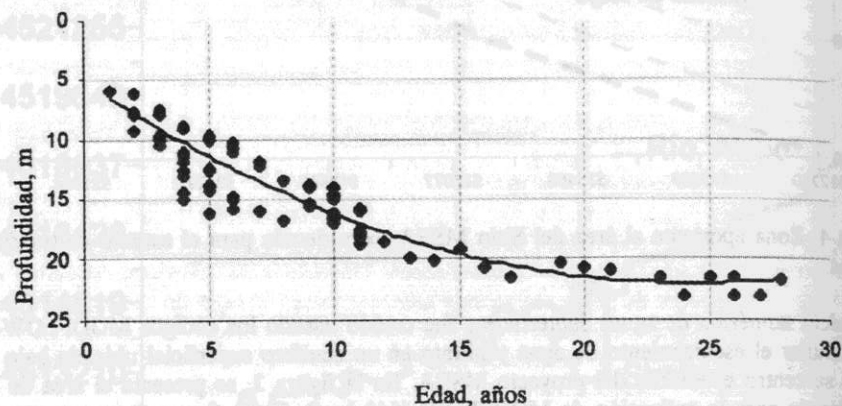


Figura 5. Distribución de la edad del agua con respecto a la profundidad bajo el Sitio MSEA.

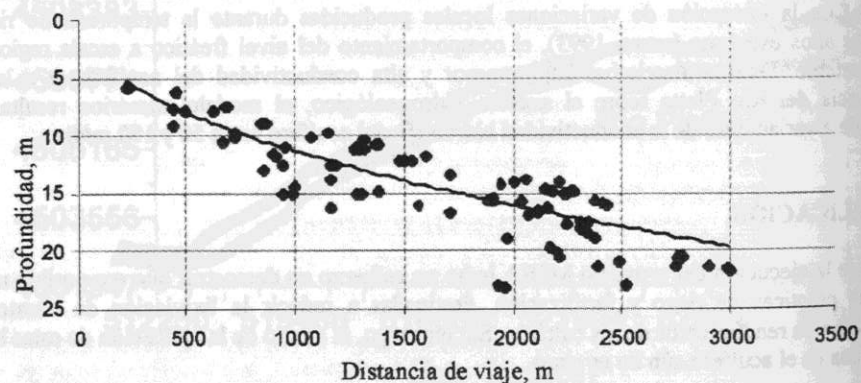


Figura 6. Distancia que han recorrido las partículas de agua localizadas bajo el sitio MSEA

Los resultados anteriores demuestran que la certificación basada en la calidad del agua bombeada desde un pozo profundo es un pobre indicador del resultado de aplicar mejores prácticas de manejo. Si la autoridad no entiende la dinámica del sistema de agua subterránea, esta situación puede generar un conflicto, pues a pesar que el agricultor utilice efectivamente mejores prácticas de manejo, no será capaz de demostrarlo con resultados concretos.

## 7. CONCLUSIONES

La principal conclusión a la cual se llegó a través del trabajo aquí presentado es el convencimiento de que la estimación de la recarga de agua y contaminante al acuífero es fundamental si se pretende evaluar impactos de actividades que se realizan sobre la superficie sobre el agua subterránea. El considerar la recarga como una variable de calibración no es aceptable, pues de esta forma no es posible evaluar ningún cambio producto de mejores prácticas de manejo.

Para entender la recarga de un acuífero, es fundamental incluir en los modelos la zona no saturada. Los efectos de la zona no saturada en la recarga son principalmente: existencia de un tiempo de retención, amortiguamiento de los pulsos con que se produce la recarga (eventos de riego y lluvia) y oportunidad para que ocurran procesos de degradación de solutos que están lixiviando.

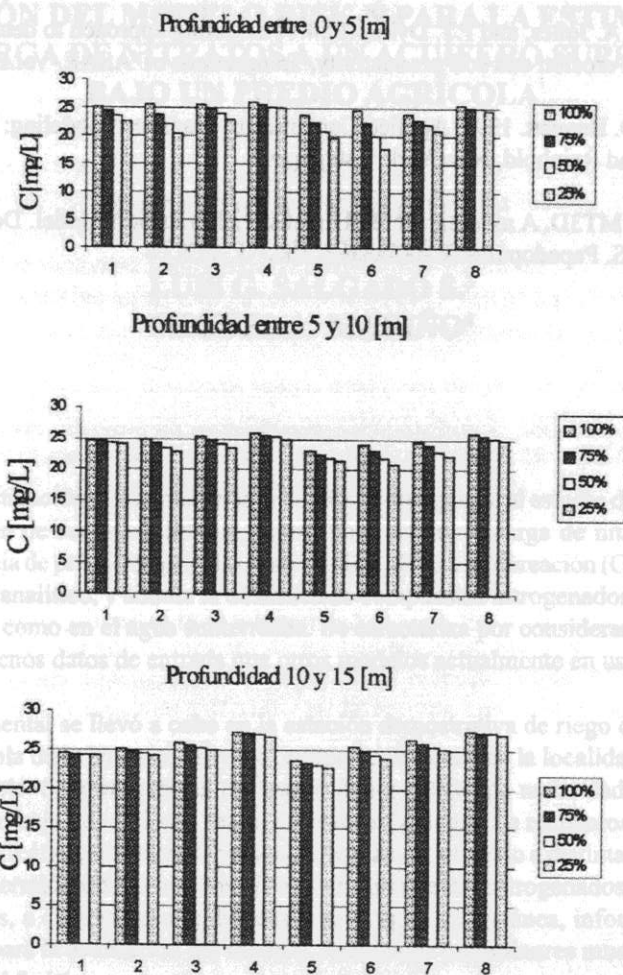


Figura 7. Concentración de  $\text{NO}_3\text{-N}$  en el entorno del sitio MSEA, después de 10 años de uso de buenas prácticas de fertilización y riego

## REFERENCIAS

Arumi, J.L. 2000. Modeling the effects of agricultural management practices on groundwater quality and quality. Ph.D. Dissertation. University of Nebraska-Lincoln, USA.

Arumí J.L., D.L. Martin y D.G. Watts 2001. Uso de una solución analítica aproximada de la ecuación de Richards para simular el movimiento del agua en la zona vadosa. Artículo presentado a este congreso, y publicado en estas memorias.

Bredeweg, S.M. 1994. Calibration of EPIC for simulating best management practices for irrigation and nitrogen. Thesis (M. S.) University of Nebraska. Lincoln.

Diffendal R.F. y F.A. Smith. 1996. Geology beneath the primary Management Systems Evaluation Area (MSEA) Site southwest of Shelton, Buffalo County, Nebraska. Geological Survey Water-Supply Paper # 1358, Washington. 12 pages.

McGuire, V.L. y J.M. Kilpatrick. 1998. Hydrogeology in the vicinity of the Nebraska management systems evaluation area site, central Nebraska. U.S. Geological Survey ; Denver, CO. 25 pages

Williams J.R., C.A. Jones, and P.T. Dyke. 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. Transactions of ASAE. Vol.27. Pp. 129-144

Zheng Ch. y G.D. Bennett. 1995. Applied Contaminant Transport Modeling: Theory and Practice. Van Nostrand Reinhold, New York. 440 pages.

Zheng, C. 1995. MT3D. A modular Three-Dimensional Transport Model. Documentation and User's Guide. S.S. Papadopulus & Associates, Inc.

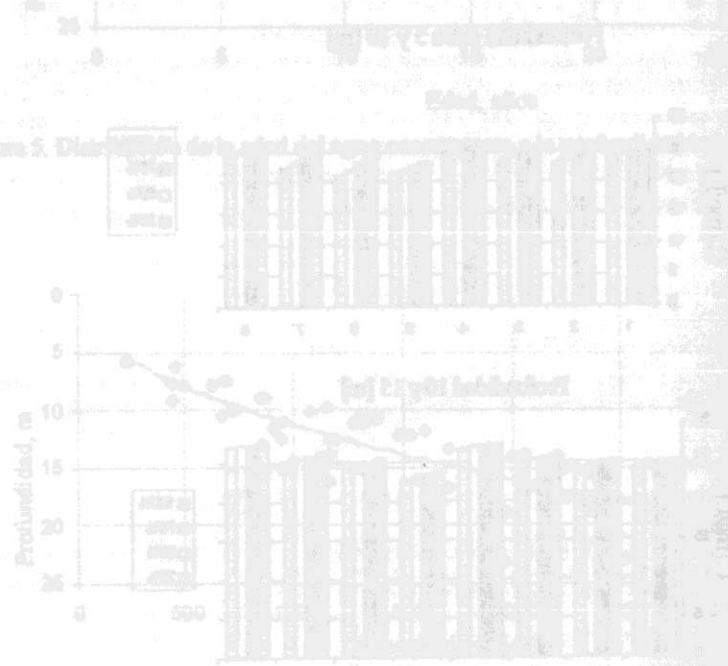


Figura 5. Distancia que han recorrido las partículas de agua desde un pozo profundo hasta la superficie del suelo.

Los resultados anteriores demuestran que la certificación basada en la información proveniente desde un pozo profundo es un pobre indicador del resultado de aplicación de fertilizantes. Si la autoridad no entiende la dinámica del sistema de agua, puede generar un conflicto, pues a pesar que el agricultor indica que no aplica fertilizante, el modelo de transporte de nitratos muestra que el agua que se extrae desde un pozo profundo contiene nitratos.

## SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

### XV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

#### EVALUACIÓN DEL MODELO RISK-N PARA LA ESTIMACIÓN DE LA RECARGA DE NITRATOS A UN ACUÍFERO SUPERFICIAL, BAJO UN PREDIO AGRÍCOLA

RICARDO A. OYARZÚN L<sup>1</sup>

JOSÉ LUIS ARUMÍ R.<sup>2</sup>

LUIS G. SALGADO S.<sup>3</sup>

MIGUEL A. MARIÑO<sup>4</sup>

#### RESUMEN

La presente investigación, actualmente en ejecución, corresponde al estudio del modelo RISK-N y la evaluación de sus posibilidades de uso para estimar recarga de nitratos a acuíferos como consecuencia de prácticas agrícolas. Este modelo, de reciente creación (Gusmán y Mariño, 1999), es de tipo analítico, y simula la dinámica de compuestos nitrogenados tanto en la zona vadosa del suelo como en el agua subterránea. Se caracteriza por considerar menos parámetros y requerir menos datos de entrada que otros modelos actualmente en uso.

La parte experimental se llevó a cabo en la estación demostrativa de riego de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Concepción, ubicada en la localidad de San Carlos, Provincia de Ñuble. Se aprovechó el desarrollo de un cultivo de maíz, dado que interesaba evaluar el modelo bajo condiciones reales de manejo agrícola. Se realizaron mediciones semanales de nivel freático, muestreos mensuales de plantas, de suelo a distintas profundidades, y de agua. Esto permitió determinar los niveles de compuestos nitrogenados, amonio y especialmente nitratos, a distintas profundidades y en el agua subterránea, información que será de gran utilidad para la evaluación del modelo. Resultados preliminares muestran que la profundidad del nivel freático presenta importantes variaciones como consecuencia de los riegos aplicados, y las concentraciones de  $N-NO_3^-$  en el agua subterránea son en general bajas, no superando los 5 mg/l.

<sup>1</sup>Alumno Magister en Ingeniería Agrícola, y <sup>2</sup> Profesor Asistente, Facultad de Ingeniería Agrícola, U. de Concepción

<sup>3</sup> Profesor Titular, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción

<sup>4</sup> Profesor Land Air and Water Resources, University of California, Davis CA.