

INFORME TÉCNICO

PROGRAMA DE FORMACIÓN PARA LA INNOVACIÓN AGRARIA

1. Antecedentes Generales de la Propuesta

Nombre Participación en Conferencia Internacional sobre Aguas Subterráneas

Código: F01-1-R-021

Entidad Responsable Postulante Individual: José Luis Arumí

Coordinador: José Luis Arumí

Lugar de Formación (País, Región, Ciudad, Localidad): España. Barcelona

Tipo o modalidad de Formación: Participación en evento técnico

Fecha de realización: 15 al 26 de Septiembre de 2001

Participantes: presentación de acuerdo al siguiente cuadro:

Nombre	Institución/Empresa	Cargo/Actividad	Tipo Productor (si corresponde)
José Luis Arumí	Universidad de Concepción	Profesor asistente	

Problema a Resolver: detallar brevemente el problema que se pretendía resolver con la participación en la actividad de formación, a nivel local, regional y/o nacional.

La Conferencia Internacional "Las Caras del Agua Subterránea" reunió a especialistas latinoamericanos y europeos que trabajan en temas relacionados con el estudio de las aguas subterráneas. Esta Conferencia fue organizada por el principal grupo de investigación hispano parlante que trabaja en el tema. En mi calidad de Investigador Joven, a un año de haber obtenido el grado de Doctor, la asistencia a este evento fue importante pues me permitió vincularme internacionalmente con investigadores de países como España, Argentina, México e Israel.



Objetivos de la Propuesta

GENERAL:

Asistir a la Conferencia Internacional “Las Caras del agua Subterráneas”

ESPECÍFICOS:

1. Presentar las dos ponencias aceptadas a la Conferencia
2. Participar en el curso Problema Inverso en Hidrología Subterránea
3. Conocer las investigaciones que se realizan, a nivel Latinoamericano y Europeo sobre el efecto de la agricultura en los recursos hídricos.
4. Contactar investigadores que estén trabajando en el área de la modelación de impactos de la agricultura en el agua subterránea para realizar futuras colaboraciones internacionales.

2. Antecedentes Generales: describir si se lograron adquirir los conocimientos y/o experiencias en la actividad en la cual se participó (no más de 2 páginas).

El resultado general de esta actividad fue exitoso, sobre todo en lo referente a la red de contactos establecida.

Durante la realización de la Conferencia Internacional se presentaron las ponencias: “Modelación del efecto de prácticas de manejo agrícola en el agua subterránea” y “Uso de una solución analítica aproximada de la Ecuación de Richards para simular el movimiento del agua en la zona vadosa” (se incluye tanto la presentación como el documento en un CD anexo).

El aspecto más positivo de la participación en la conferencia fue el establecer contactos personales con una serie de investigadores que trabajan en el tema del agua subterránea. En el punto 6 se presenta una lista con los contactos relevantes realizados.

En lo referente a la revisión del estado del arte, la Conferencia fue muy amplia en los temas tratados, por lo que se pudo tener una visión general de investigaciones realizadas en España, Francia, Israel, México y Argentina.

El contacto con el profesor Gómez de la Universidad Politécnica de Cataluña, permitió estrechar la amistad que se tenía de su visita a Chile y pensar en futuras acciones de intercambio, tales como: cursos cortos del profesor Gómez en Chile e intercambio de estudiantes. Esto abre la posibilidad de que estudiantes de la Universidad de Concepción trabajen con el Profesor Gómez en España.

Durante la visita al Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cataluña, se conoció de primera fuente el trabajo que se realiza allá. Importante fue ver las soluciones que ellos han realizado a problemas técnicos similares a los que existen en Chile. Además ellos son muy eficientes en el uso de los recursos del Laboratorio. Lo anterior permitió aclarar dudas que



existían en la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Concepción sobre como utilizar nuestra propia infraestructura.

Lamentablemente no se pudo participar en el curso Problema Inverso en Hidrología Subterránea, porque el costo del curso excedió el presupuesto original del programa. Lo anterior se debió a dos razones: El alza del Dólar con respecto al Peso y al hecho de que el curso inicialmente estaba programado para ser de un día y cambiando posteriormente a dos, con el consiguiente aumento del costo de matrícula. Sin embargo, el no haber participado de ese curso no influyó en el éxito de esta visita, pues el tema del curso es muy específico y puede ser estudiado en la literatura técnica disponible.

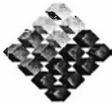
3. Itinerario Realizado: presentación de acuerdo al siguiente cuadro:

Fecha	Actividad	Objetivo	Lugar
17/09/2001	Arribo a España		
18/09/2001	Visita Universidad Politécnica de Cataluña	Inscripción en Curso, Visita Biblioteca	Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)
19 al 21 de septiembre	Conferencia Las Caras del Agua Subterránea	Participación en evento	UPC
25 de septiembre	Visita Profesor Manuel Gómez Valentín	Intercambio académico	UPC
26 de septiembre	Retorno a Chile.		

Por las razones expuestas en el punto anterior no se pudo participar en el curso "Problema Inverso en Hidrología Subterránea". Además el día 24 de septiembre fue feriado en Barcelona, por tratarse del aniversario de la ciudad, situación que se desconocía antes del viaje.

4. Resultados Obtenidos: descripción detallada de los conocimientos adquiridos. Explicar el grado de cumplimiento de los objetivos propuestos, de acuerdo a los resultados obtenidos. Incorporar en este punto fotografías relevantes que contribuyan a describir las actividades realizadas.

1. Participación en la Conferencia: se presentaron las ponencias: "Modelación del efecto de prácticas de manejo agrícola en el agua subterránea" y "solución analítica aproximada de la Ecuación de Richards para simular el movimiento del agua en la zona vadosa".
2. Curso Corto. No se pudo asistir al curso por las razones explicadas en el punto 2.
3. Estado del arte: con referencia al tercer objetivo específico, la Conferencia fue muy amplia en los temas tratados, por lo que se pudo tener una visión general de investigaciones realizadas en España, Francia, Israel, México y Argentina.



4. Red de contactos: el aspecto más positivo de la participación en la conferencia fue el establecer contactos personales con una serie de investigadores que trabajan en el tema del agua subterránea. En el punto 6 se presenta una lista con los contactos relevantes realizados.

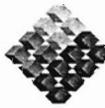
5. Aplicabilidad: explicar la situación actual del rubro en Chile (región), compararla con la tendencias y perspectivas en el país (región) visitado y explicar la posible incorporación de los conocimientos adquiridos, en el corto, mediano o largo plazo, los procesos de adaptación necesarios, las zonas potenciales y los apoyos tanto técnicos como financieros necesarios para hacer posible su incorporación en nuestro país (región).

La aplicabilidad de los resultados de esta propuesta se concentra principalmente en el área académica. Concretamente se abre la posibilidad de realizar intercambio académico (con Universidades e institutos Españoles y Argentinos) y mejorar la postulación a proyectos de investigación.

Una posibilidad interesante para investigación es aprovechar la experiencia Israelita en el riego con aguas servidas para el fomento de las localidades del Secano Interior. Se pretende presentar un proyecto en este tema al FIA durante el próximo año.

6. Contactos Establecidos: presentación de acuerdo al siguiente cuadro:

Institución/Empresa	Persona de Contacto	Cargo/Actividad	Fono/Fax	Dirección	E-mail
Universidad Nacional de La Plata	Mario hernández	Profesor Titular	54-221-4229923	21 N° 158 (1896) City Bell Argentina	Mari_h@sinectis.com.ar
Universidad Politécnica de Cataluña	Xavier Sánchez Vila	Profesor	34 93 401 1698 34 93 401 7251	Jordi Girona 1-3 Edf. D-2 España	Xavier.sanchez-vila@upc.es
Instituto de Hidrología de Llanuras	Eduardo Usunoff	Director	54 02281 43-2666	Intendente Giraut s/n CC 44 Argentina	Eusunoff@faa.unicen.edu.ar
State of Israel, Water Commission	Daniel Ronen	Investigador	972 3 636 9648	Hamasger Str. 14 Tel-Aviv 61203 Israel	Dronen2@netvision.net.il



7. Detección de nuevas oportunidades y aspectos que quedan por abordar: señalar aquellas iniciativas detectadas en la actividad de formación, que significan un aporte para el rubro en el marco de los objetivos de la propuesta, como por ejemplo la posibilidad de realizar nuevos cursos, participar en ferias y establecer posibles contactos o convenios. Indicar además, en función de los resultados obtenidos, los aspectos y vacíos tecnológicos que aún quedan por abordar para la modernización del rubro.

Un interesante tema que en Chile no se abordado es el tema de la Hidrogeología Urbana. En las ciudades la principal fuente de recarga de los acuíferos son filtraciones de las redes de agua potable y alcantarillado, esto provoca problemas de contaminación y de balance hídrico que deben ser estudiados.

Otro tema factible de atacar es desarrollar mas el riego con aguas servidas en las zonas áridas del territorio nacional. Esto no sólo incluye el Norte del país, sino que el Secano interior de la zona central.

Es importante estudiar los mecanismos de recarga de agua subterránea. En nuestro país se están otorgando derechos de aprovechamiento de agua subterránea sin acabados estudios que permitan determinar el balance de agua subterránea, en especial en la zona centro sur.

8. Resultados adicionales: capacidades adquiridas por el grupo o entidad responsable, como por ejemplo, formación de una organización, incorporación (compra) de alguna maquinaria, desarrollo de un proyecto, firma de un convenio, etc.

Existe una invitación por parte de la Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea para el Desarrollo (ALHSUD) par incorporar a la Universidad de Concepción en una red de latinoamericana de doctorados. Esta invitación se deberá formalizar a principios del próximo año.

9. Material Recopilado: junto con el informe técnico se debe entregar un set de todo el material recopilado durante la actividad de formación (escrito y audiovisual) ordenado de acuerdo al cuadro que se presenta a continuación (deben señalarse aquí las fotografías incorporadas en el punto 4):

Tipo de Material	Caracterización (título)
Ej.:	
Disco Compacto	Presentaciones en Power Point realizadas durante la conferencia y en las Charlas de transferencia. Copia de los artículos presentados a la Conferencia

10. Aspectos Administrativos

10.1. Organización previa a la actividad de formación

Como fue una actividad individual no se consideró pertinente llenar esta parte del informe

10.2. Organización durante la actividad (indicar con cruces)

Ítem	Bueno	Regular	Malo
Recepción en país o región de destino	x		
Transporte aeropuerto/hotel y viceversa	x		
Reserva en hoteles	x		
Cumplimiento del programa y horarios	x		

En caso de existir un ítem Malo o Regular, señalar los problemas enfrentados durante el desarrollo de la actividad de formación, la forma como fueron abordados y las sugerencias que puedan aportar a mejorar los aspectos organizacionales de las actividades de formación a futuro.

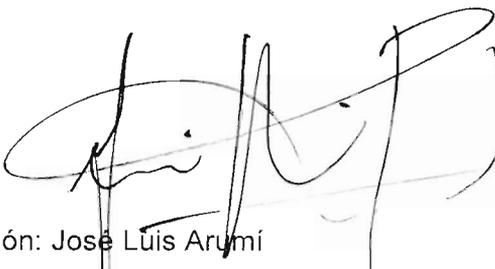
11. Conclusiones Finales

La asistencia a la Conferencia Internacional Las Caras del Agua Subterránea permitió fortalecer la red de contactos internacionales de quien suscribe este informe. Además, como ya se ha expresado en este documento se abren nuevas oportunidades de investigación: como lo es el riego con aguas servidas, la hidrogeología urbana y la recarga de agua subterránea.

Se pudo lograr una serie de contactos internacionales que en definitiva serán la utilidad mas provechosa de esta experiencia.

Fecha: 19 de diciembre

Nombre y Firma coordinador de la ejecución: José Luis Arumi



AÑO 2001

USO DE UNA SOLUCIÓN ANALÍTICA APROXIMADA DE LA ECUACION DE RICHARDS PARA SIMULAR EL MOVIMIENTO DEL AGUA EN LA ZONA VADOSA

J. L. Arumi¹, D. L. Martin² y D. G. Watts²

¹ Profesor Asistente, Universidad de Concepción. Casilla 537, Chillan, Chile. E-mail jarumi@udec.cl

² Professors. University of Nebraska–Lincoln. Lincoln, NE, 68583-0726. U.S.A.

Resumen: Se presenta el desarrollo de un algoritmo basado en el uso de la técnica de descomposición para producir una solución aproximada de la ecuación de Richards. El objetivo de la creación de este algoritmo fue la construcción de un modelo rápido que permitiera la conexión entre una serie de análisis hechos con modelos agrícolas y un modelo regional de aguas subterráneas.

Palabras Clave: Ecuación de Richards, Solución analítica, Zona vadosa, Modelos

INTRODUCCIÓN

Se presenta el desarrollo de un algoritmo basado en el uso de la técnica de descomposición para producir una solución aproximada de la ecuación de Richards (ecuación que describe el movimiento de agua en suelos no saturados). El objetivo de este trabajo fue crear un algoritmo relativamente simple y rápido de procesar. Dicho algoritmo debe permitir la integración, sobre una región geográficamente extensa, de los resultados de simulaciones realizadas con modelos agrícolas (como EPIC o OPUS), conectándolos con un modelo regional de aguas subterráneas (MODFLOW - MT3D). Para ello el modelo debe estimar el volumen estimado de agua que alcanza cierta profundidad de la zona vadosa después que una cantidad conocida de agua ha percolado desde la zona radicular.

ECUACIÓN DE RICHARDS

Debido a que la percolación de agua es un proceso predominantemente vertical esta puede ser representada por la ecuación de Richards aplicada sobre una columna de suelo.

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

En la ecuación 1, z es la elevación (positiva hacia abajo), t es el tiempo, $\theta(z, t)$ es el contenido volumétrico de agua en el suelo, $K(\theta)$ es la conductividad del suelo no saturado y $D(\theta)$ es la difusividad del agua en el suelo. Para la resolución de la ecuación de Richards es necesario introducir expresiones que representen la relación entre la retención de agua y la conductividad hidráulica no saturada. Las expresiones más utilizadas corresponden a las funciones de Brooks and Corey (1966) y Van Genuchten (1980) ambos modelos corresponden a funciones altamente no lineales, pero cuyos parámetros pueden ser estimados usando las propiedades físicas del suelo. En general las funciones de Van Genuchten (VG) coinciden con datos experimentales sobre un amplio rango de suelos y por eso es ampliamente utilizada en modelación. Sin embargo, la expresión matemática de VG es muy compleja, razón por la que se prefirió usar las funciones de Brooks and Corey.

A pesar de que la ecuación de Richards es altamente no lineal y su solución analítica es difícil de obtener, ha existido un significativo número de contribuciones sobre el tema. Broadbrige and White (1988) presentaron una solución analítica para una columna de suelo semi-infinita, con una condición inicial de humedad uniforme y una recarga positiva constante. Warrick y colaboradores (1991) extienden la solución de Broadbrige and White para cualquier condición inicial de humedad en el suelo y para condiciones variables de recarga. Esta solución, esta basada en el uso de una serie de transformaciones matemáticas para resolver una expresión adimensional de la ecuación de Richards. A pesar de que es una solución analítica exacta, su uso para la construcción de un algoritmo, resultó ser difícil e inestable. La solución diverge cuando el perfil de humedad de suelo se aproxima a las condiciones de gradiente unitario (presión hidrostática constante con respecto a la profundidad).

Serrano (1998) usa el método de descomposición para desarrollar una solución aproximada de la ecuación de Richards. Se consideró que este método ofrecía la posibilidad de obtener una aproximación de la solución analítica factible de ser implementada en un algoritmo computacional.

DESARROLLO DEL MODELO.

La base del método de descomposición es la suposición de que la difusividad alcanza un valor máximo (D_s) cerca de la presión de entrada de aire en el suelo, donde el contenido de agua en el suelo se acerca a la saturación y la conductividad hidráulica se aproxima al valor saturado. Definiendo una función auxiliar:

$$D_p(\theta) = D_s - D(\theta) \tag{2}$$

Remplazando la expresión anterior en la ecuación de Richards:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = D_s \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} - \frac{\partial D_p}{\partial z} \frac{\partial \theta}{\partial z} - D_p \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} - \frac{\partial K}{\partial z} \tag{3}$$

Es posible reescribir la ecuación de Richards de la siguiente forma:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} - D_s \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \frac{\partial D_p}{\partial \theta} \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^2 + D_p \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \frac{\partial K}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0 \tag{4}$$

Los primeros dos términos de la ecuación 4 corresponden a la parte lineal de la ecuación de Richards y los otros tres términos son sus componentes no lineales. Según Serrano (1998) la solución de la ecuación anterior esta dada por la siguiente expresión:

$$\theta = \theta_0 - \int_0^t \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cdot dt \tag{5}$$

En la expresión 5, θ_0 es la solución de la componente lineal de la ecuación de Richards, que es conocida como la ecuación de difusividad lineal. El segundo término del lado derecho corresponde a la solución de los componentes no lineales de la ecuación.

La ecuación de difusividad lineal, para una columna vertical de suelo es expresada como:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = D_s \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \tag{6}$$

Considerando el caso de una columna seminfinita, con una condición inicial de humedad constante y una condición de borde superior dada por una serie de pulsos:

$$\theta(0, t) = \sum_j \Phi(t - T_j) \Delta \theta_j \tag{7}$$

La solución de la ecuación 6, sujeta a la condición de borde 7 esta dada por la siguiente expresión (Arumí, 2000):

$$\theta_0(z, t) = \sum_j \Delta \theta_j \cdot \text{erfc} \left(\frac{z}{\sqrt{4 \cdot D_s \cdot (t - T_j)}} \right) \Phi(t - T_j) + \theta_i \tag{8}$$

En la expresión anterior, $\text{erfc}(x)$ corresponde al complemento de la función de error; $\Phi(x)$ es la función escalón de Heaviside (0 si $x < 0$ o 1 en otro caso).

Según Serrano (1998) Los términos no lineales, que conforman el segundo término del lado derecho de la ecuación 5 pueden ser calculados usando las siguientes expresiones:

$$A_0 = N(\theta_0), \quad A_1 = \theta_1 \frac{dN(\theta_0)}{d\theta_0}, \quad A_2 = \theta_2 \frac{dN(\theta_0)}{d\theta_0} + \frac{\theta_1^2}{2!} \frac{d^2 N(\theta_0)}{d\theta_0^2} \tag{9,10 y 11}$$

En las expresiones anteriores, $N(\theta)$ incorpora los términos no lineales de la solución y es expresado usando la siguiente ecuación (Serrano, 1998):

$$N(\theta) = \frac{\partial D_p}{\partial \theta} \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^2 + D_p \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} - \frac{\partial K}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (12)$$

La serie converge rápidamente en este caso el término A_2 puede ser considerado despreciable. La función de Brooks and Corey fue usada para incorporar la relación entre conductividad hidráulica, dispersión y contenido de agua en el suelo.

Usando el desarrollo anterior fue posible crear un algoritmo que calcule el contenido volumétrico de agua en el suelo en función del tiempo y la profundidad. Las integraciones necesarias para las ecuaciones fueron hechas numéricamente.

RESULTADOS

El modelo desarrollado en este trabajo fue denominado "Vadose Zone Model" (VZM). Se validó el modelo utilizando una comparación de los resultados producidos por el modelo con los valores estimados por el modelo HYDRUS-2D usando el mismo dominio, condiciones de borde y valores iniciales de humedad en el suelo.

HYDRUS-2D (Simunek y colaboradores, 1996) es un modelo de simulación numérica, para el movimiento de agua y solutos en un medio poroso con un grado de saturación variable. El modelo HYDRUS-2D es una modernización del modelo SWMS-2D que utiliza el método de elementos finitos para resolver la ecuación de Richards. Ambos modelos (VZM y HYDRUS-2D) fueron usados para simular el movimiento de una serie de pulsos de aguas aplicados en la parte superior de una columna vertical de suelo. Estos pulsos, tienen por objetivo simular la percolación mensual que se produce desde la zona radicular de un área cultivada. La comparación estuvo basada en la determinación del volumen de agua que alcanza una profundidad de 2, 5 y 10 metros en tres tipos distintos de columnas de suelo: arena, franco y limo. La condición de borde superior fue determinada asignando un valor de contenido de agua en el suelo, de forma tal que el flujo de agua bajo condiciones de gradiente unitario, sea el mismo que el flujo medio mensual correspondiente al mes simulado. Las condiciones iniciales fueron estimadas sobre la base de simulaciones de 15 años hechas con HYDRUS-2D, para cada tipo de suelo.

El volumen de agua infiltrado simulado con VZM es persistentemente menor que el volumen simulado con HYDRUS-2D. Esta diferencia se debe a que componente lineal de la solución, representada por la ecuación 6 no incluye un término que represente la acción de la gravedad. Como dicha solución no incluye la acción de la gravedad, al simular el movimiento de agua en una columna vertical, se obtiene un menor valor de velocidad de infiltración que el que ocurre en la realidad. En un principio se supuso que los términos no lineales de la solución, expresados en la segunda componente del lado derecho de la ecuación 6 debían compensar la simplificación mencionada anteriormente, pero los resultados demostraron en forma consistente que esto no se produjo. Como continuación de este trabajo, en este momento se está desarrollando una nueva solución que incluirá una componente de gravedad en la ecuación 6.

En la figura 1 se presenta la tasa de infiltración estimada usando VZM con diferentes condiciones de borde en la parte superior de una columna de suelo franco. Por las razones que se explicaron anteriormente, este valor es persistentemente menor que el valor correspondiente a la existencia de una condición de gradiente unitario en la parte superior de la columna de suelo. Sin embargo la curva generada con VZM puede ser utilizada para la calibración de la condición de borde superior de la columna de suelo.

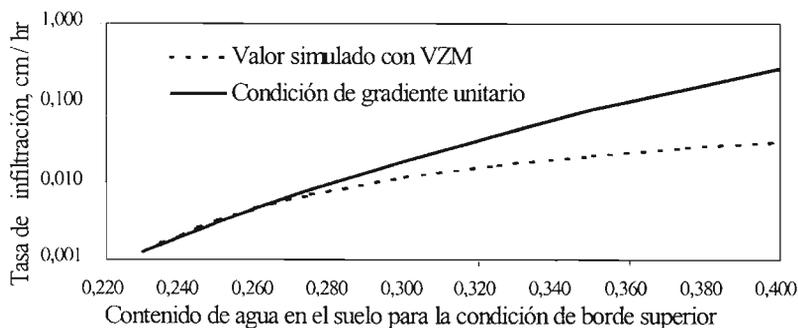


Figura 1. Tasa de infiltración estimada usando VZM en función de la condición de borde superior de la columna de suelo franco.

Como el volumen de agua que se desea infiltrar es conocido por las simulaciones mensuales hechas con el modelo agrícola, es posible calcular la tasa media mensual de percolación de la zona radicular. La condición de borde superior puede ser ajustada de forma tal de que el valor de infiltración simulado produzca una tasa similar al valor medio mensual de agua que se esta introduciendo a la zona vadosa.

La altura de agua acumulada que alcanzó un punto de control ubicado a cinco metros de profundidad en un suelo franco, es mostrada en la figura 2. Como se puede observar al ajustar la condición de borde superior, VZM predice valores cercanos a aquellos obtenidos usando HYDRUS-2D.

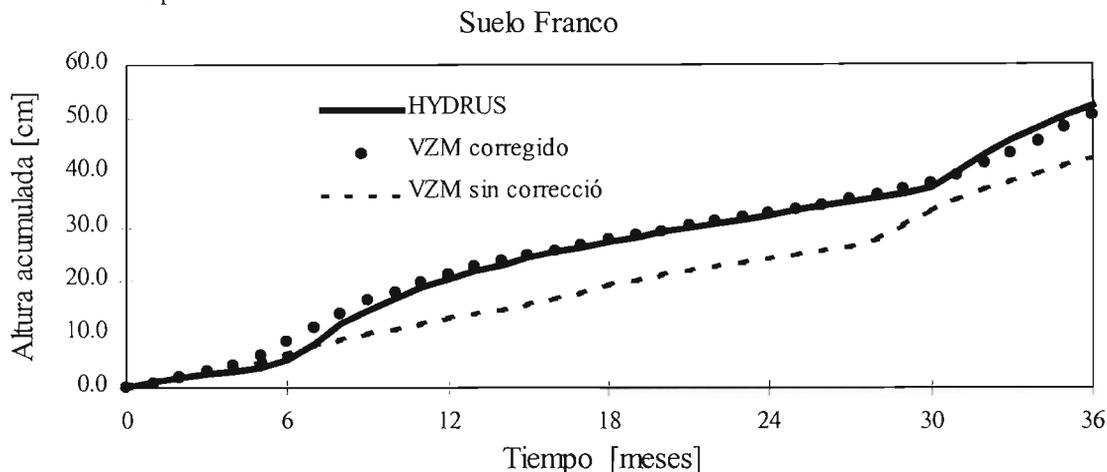


Figura 2, Altura de agua acumulada que alcanza los 5 metros de profundidad en un suelo franco durante 3 años de simulación.

CONCLUSIONES

Se desarrolló un modelo simple para la simulación del movimiento de agua en el suelo no saturado. Dicho modelo es más limitado que modelos numéricos como HYDRUS-2D. Pero, también es más simple de usar y requiere de mucho menos tiempo computacional. En un estudio a escala regional, la principal limitante para el análisis del efecto de la zona vadosa en la recarga del agua subterránea es la obtención de los parámetros que caracterizan los distintos tipos de suelos presentes en el área. Este es un trabajo formidable y muy difícil de lograr a un costo razonable. Es por esa razón que el uso de una herramienta simple como VZM permite entender cual es el efecto, a escala regional, de la zona vadosa en la recarga de agua y lixiviación de nutrientes en el sistema de aguas subterráneas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Arumí, J.L. 2000. *Modeling the effects of agricultural management practices on groundwater quality and quality*. Ph.D. Dissertation. University of Nebraska-Lincoln, USA.
2. Broadbridge, P. and I. White. 1988. *Constant rate rainfall infiltration: A versatile nonlinear model. I Analytical solution*. Water Resources Research. Vol. 24. Pp. 145-154.
3. Brooks R. H. and A. T. Corey. 1966. *Properties of porous media affecting fluid flow*. Journal of Irrigation and Drainage, ASCE. Vol. 92, Pp. 61-88.
4. Lenhard R. J., J. C. Parker and S. Mishra. 1989. *On the correspondence between Brooks-Corey and Van Genuchten Models*. Journal of Irrigation and Drainage ASCE. Vol. 115. Pp. 744-751.
5. Serrano S. E. 1998. *Analytical decomposition of the nonlinear unsaturated flow equation*. Water Resources Research. Vol. 34. Pp. 397-407.
6. Simunek J., M. Sejna and van Genuchten M.Th. 1996. *HYDRUS-2D, simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media*. International Ground Water Modeling Center, Golden, Colorado.
7. Stankovich J. M. and D. A. Lockington. 1995. *Brooks-Corey and Van Genuchten soil-water-retention models*. Journal of Irrigation and Drainage. ASCE. Vol. 121. Pp.1-7.
8. Van Genuchten, M.T. 1980. *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Science Society of America Journal. Vol. 44. Pp. 892-898.
9. Warrick A. W., A. Islas and D. O. Lomen. 1991. *An analytical solution for Richards' Equation for time-varying infiltration*. Water resources research. Vol. 27. Pp. 763-766.

MODELACIÓN DEL EFECTO DE PRÁCTICAS DE MANEJO AGRÍCOLA EN EL AGUA SUBTERRÁNEA

J. L. Arumí¹, D. L. Martín² y D. G. Watts²

¹ Profesor Asistente, Universidad de Concepción. Casilla 537, Chillan, Chile. E-mail jarumi@udec.cl

² Professors. University of Nebraska–Lincoln. Lincoln, NE, 68583-0726. U.S.A.

Resumen: Se presenta el desarrollo de 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 la disponibilidad de esta. La metodología se aplicó en una región sometida a una explotación agrícola intensiva y se determinó que tras 10 años de aplicar buenas practicas de riego y fertilización, las mejoras en la calidad del agua subterránea sólo se producen en la parte superficial del acuífero.

Palabras Clave: Modelación, Modflow, Mt3d, Recarga, Riego, Fertilización

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 practicas 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 el Valle Central del Río Platte, en el Estado de Nebraska, donde se encuentra ubicada la estación experimental del Proyecto MSEA (figura 1).

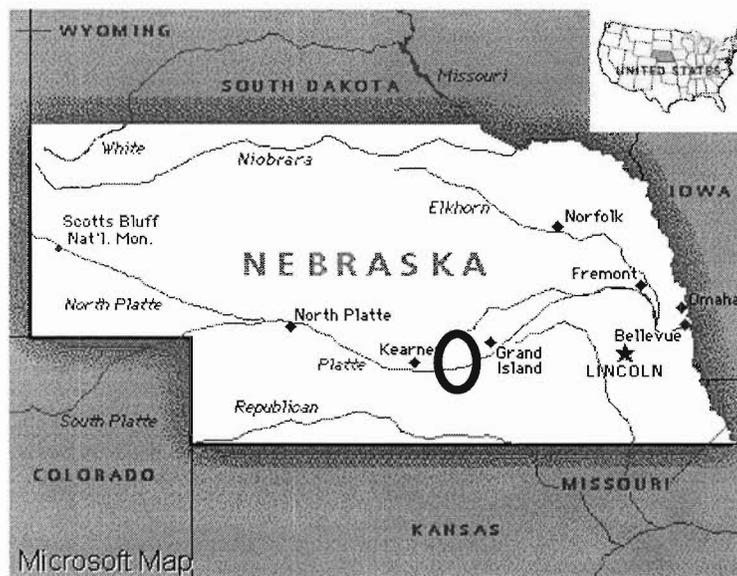


Figura 1. Ubicación del área donde se desarrolla el proyecto MSEA

Metodología

La modelación se ha usado intensivamente para predecir el impacto de diferentes alternativas de manejo agrícola que se puedan implementar. Sin embargo, la mayor parte de los modelos desarrollados no poseen una conexión definida entre la simulación de las prácticas que se realizan en la superficie y el impacto en las aguas subterráneas. El transporte de agua y nutrientes a través de la zona vadosa es frecuentemente despreciado o sobre-simplificado. Lo anterior a pesar de 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 de los dominios de ambos tipos de modelos dificulta su conexión, y hace necesario 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 conectar diferentes modelos de la forma indicada en la figura 2 (Arumí, 2000).

Se utilizó el modelo EPIC (Williams et al. 1984) 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. 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-nitrogeno.

En el área de estudio la zona vadosa tiene un espesor que varía desde 2 a 10 metros. En general esta 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. Por este motivo se utilizó un modelo para la zona vadosa (Arumí et al. 2001) el cual 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)

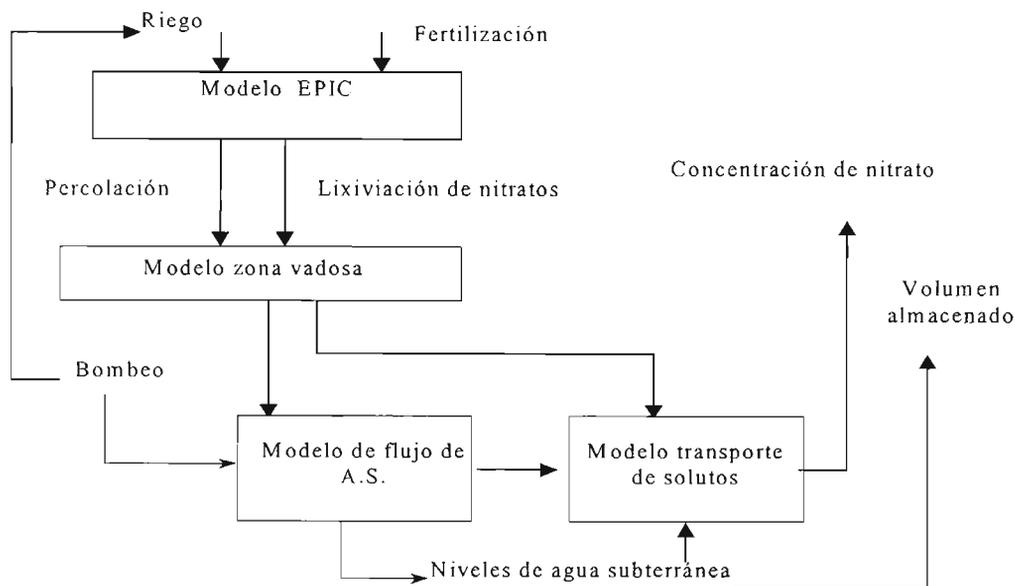


Figura 2. Esquema conceptual de la metodología

El modelo 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. 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.

En la figura 3 se presenta el área de estudio considerada para la aplicación de MODFLOW (440 Km²). En la figura 4 se presenta el área considerada para el estudio de transporte de nitratos usando MT3D (90 Km²). La mayor extensión del área considerada en MODFLOW se debe a que fue necesario aprovechar las condiciones de borde existentes para el modelo hidrogeológico.

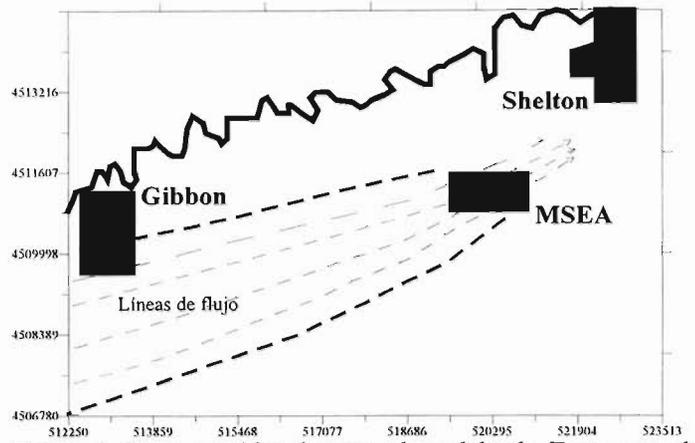
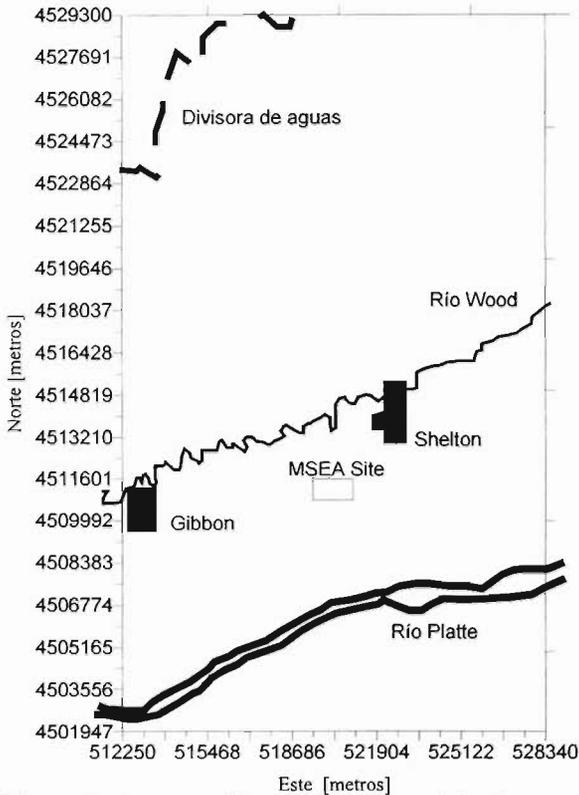


Figura 4. Zona considerada para el modelo de Transporte de nitratos.

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

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 que 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 mas de 2000 metros aguas arriba.

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.

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 utiliza efectivamente mejores prácticas de manejo, no es capaz de demostrarlo con resultados concretos.

Conclusión sobre la metodología

La principal conclusión a que 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.

Referencias Bibliográficas

1. Arumí, J.L. 2000. *Modeling the effects of agricultural management practices on groundwater quality and quality*. Ph.D. Dissertation. University of Nebraska-Lincoln, USA.
2. 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*. Presentado a este congreso.
3. Bredeweg, S. M. 1994. *Calibration of EPIC for simulating best management practices for irrigation and nitrogen*. Thesis (M. S.) University of Nebraska. Lincoln.
4. Diffendal R. F. and 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.
5. McGuire, V. L. and 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
6. 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
7. Zheng Ch. And G. D. Bennett. 1995. *Applied contaminant transport modeling, theory and practice*. Van Nostrand Reinhold, New York. 440 pages.
8. Zheng, C. 1995. MT3D. *A modular Three-Dimensional Transport Model. Documentation and User's Guide*. S.S. Papadopoulos & Associates, Inc.