

# REPRESENTACIÓN DEL MOVIMIENTO DE BROMURO CON LA TÉCNICA DE VISUALIZACIÓN VOLUMÉTRICA

## Representation of Bromide Movement by the Volume Visualization Technique

F.G. Echavarría-Cháirez<sup>1†</sup>, C.A. Shapiro<sup>2</sup>, G.W. Hergert<sup>2</sup> y W. Kranz<sup>2</sup>

### RESUMEN

La técnica de visualización volumétrica permite representar cualquier fenómeno en una figura geométrica que pueda ser reconstruida como un sólido con características de continuidad, distribución y estructura en capas o niveles. El bromuro de potasio (KBr) se usó como trazador en un estudio en el cual se comparó irrigación por surcos alternados con irrigación completa. El anión bromuro ( $\text{Br}^-$ ), al disociarse, se usa como simulador del movimiento de nitratos ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ). El KBr se aplicó a 60 sitios de 0.3 x 1.2 m distribuidos a lo largo del surco de manera equidistante (cinco sitios) y en 12 surcos de acuerdo con un diseño experimental en 6.5 ha. Se realizaron tres muestreos en cuatro profundidades secuenciadas, después del primer y tercer riego y después de cosecha del cultivo de maíz; los sitios de muestreo se georeferenciaron. Se usó geoestadística para interpolar los valores de  $\text{Br}^-$  por medio de la técnica de Kriging. Al ordenar verticalmente los contornos o las capas de valores de concentración de  $\text{Br}^-$ , el programa IDL (Interactive data language) creó una imagen cúbica, la cual reconstruyó el movimiento del  $\text{Br}^-$  en el suelo. Las imágenes reconstruidas se compararon con gráficas convencionales. Además, las imágenes sirvieron para identificar los sitios con flujo preferencial, donde el  $\text{Br}^-$  se movió a mayor profundidad. Con irrigación de surco continuo, el  $\text{Br}^-$  se movió 1.52 m y con riego alternado 0.72 m. Al simular el movimiento de  $\text{NO}_3\text{-N}$  con  $\text{Br}^-$  desde la superficie del suelo y su posterior lixiviación debajo de la zona radicular, permitió conocer la estructura de la distribución horizontal y vertical,

así como la reducción de la percolación de  $\text{NO}_3\text{-N}$  con el tratamiento de irrigación y fertilización alternada.

**Palabras clave:** imágenes reconstruidas, Kriging, bromuro de potasio, IDL.

### SUMMARY

The volume visualization technique allows representing any phenomenon in a solid geometric shape, with characteristics of continuity, distribution and structure in layers or levels. Potassium bromide (KBr) was used as a tracer in a study where alternated row irrigation was compared against complete irrigation. The anion bromide ( $\text{Br}^-$ ), when it dissociates from KBr, may be used as simulator of the nitrate ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) movement. The KBr was applied at 60 sites of 0.3 x 1.2 m distributed along the length of the furrow (five sites) keeping the same distance between each and using 12 furrows according to an experimental design. Three samplings in four sequenced depth levels were taken after the first and third irrigation and after harvesting corn. Geostatistics was used to interpolate the  $\text{Br}^-$  values by means of Kriging. Georeferenced sample points were distributed in a 6.5 ha field. By stacking a series of 3-D  $\text{Br}^-$  surfaces, the IDL (Interactive data language) program created a cubic image that reconstructed the  $\text{Br}^-$  movement in soil. Reconstructed images were compared against conventional graphics; also, preferential flow was identified where  $\text{Br}^-$  moved deeper. Under continuous row irrigation,  $\text{Br}^-$  moved 1.52 m and under alternated row irrigation,  $\text{Br}^-$  moved only 0.72 m. When simulating the  $\text{NO}_3\text{-N}$  movement with  $\text{Br}^-$  from the soil surface beyond the radical zone, this permitted determination of the structure of horizontal and vertical distribution, as well as the  $\text{NO}_3\text{-N}$  leaching under the alternated irrigation and fertilization.

**Index words:** image rendering, Kriging, potassium bromide, IDL.

<sup>1</sup> Campo Experimental Zacatecas, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. km 24.5 Carretera Zacatecas-Fresnillo, 98500 Calera, Zacatecas, México.

<sup>†</sup> Autor responsable (echavarría.francisco@inifap.gob.mx)

<sup>2</sup> Departamento de Agronomía, Universidad de Nebraska. Lincoln, NE.

## INTRODUCCIÓN

La contaminación por nitratos ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ), debida a aplicaciones de fertilizantes nitrogenados, es un problema grave en regiones de acuíferos someros, como el Estado de Nebraska, EEUU. Se ha monitoreado que cada año se incrementa  $1 \text{ mg L}^{-1}$  de  $\text{NO}_3\text{-N}$  al acuífero (Engberg y Spalding, 1978), cuando la norma indica que el valor máximo de  $\text{NO}_3\text{-N}$  permitido en agua potable es  $10 \text{ mg L}^{-1}$  (Stevenson, 1986). Para reducir la incorporación de  $\text{NO}_3\text{-N}$  al acuífero, se han diseñado estrategias como la combinación de riego y fertilización alternada, lo que significa colocar el fertilizante nitrogenado en el surco seco, con el objeto de reducir la mineralización y movilidad del  $\text{NO}_3\text{-N}$ . Sin embargo, debido a que es difícil monitorear  $\text{NO}_3\text{-N}$  en el suelo, ya que existe una mineralización continua a partir de la materia orgánica, el movimiento de  $\text{NO}_3\text{-N}$  es simulado por  $\text{Br}^-$ , el cual es un anión que presenta características de movilidad semejantes a  $\text{NO}_3\text{-N}$ , pero es fácil de identificar y no es común hallar altas concentraciones de él en suelo.

Con la disponibilidad de mayor capacidad en los equipos de cómputo, en los últimos años se ha explorado el uso de imágenes reconstruidas como un medio para visualizar diversos fenómenos, como es la porosidad del suelo (Perret *et al.*, 1999), la visualización de patrones de flujo en suelos repelentes (Ritsema *et al.*, 1997), la identificación de escapes o fugas de sólidos en una planta desalinizadora (Helly y Herbinson, 1994) o las dimensiones de nubes en estudios atmosféricos (Research Systems, 1997).

Con el objetivo de representar el movimiento de  $\text{Br}^-$ , el cual simula el movimiento de  $\text{NO}_3\text{-N}$ , se midieron los cambios de concentración de este anión a través del perfil del suelo con dos tratamientos de riego.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El sitio de estudio se ubicó en el Centro de Investigación y Extensión del Centro - Oeste, que pertenece a la Universidad de Nebraska y se localiza en la ciudad de North Platte, Nebraska, EEUU, localizado a  $41^\circ 05' \text{ N}$  y  $100^\circ 46' \text{ O}$ , a una altitud de 862 m. La superficie del sitio de estudio fue de 6.5 ha. El suelo se clasifica como un Mollisol (fine silty, mixed, mesic, Tepic haplustolls), de acuerdo con la clasificación del USDA (1978). El presente trabajo es un estudio complementario a un experimento de

evaluación del uso de irrigación y fertilización alternada en el cultivo de maíz. Los tratamientos de irrigación fueron dos: irrigación a surco continuo e irrigación por surco alternado. Lo importante en este estudio fue contar con la disponibilidad de surcos sin irrigación y con irrigación a lo largo del ciclo para evaluar el movimiento del  $\text{Br}^-$ , como simulador del  $\text{NO}_3\text{-N}$ , con riego alternado y riego continuo, considerando exclusivamente el efecto de irrigación, pero distribuyendo los sitios de medición de acuerdo con el diseño experimental. Se utilizó un diseño factorial con arreglo en parcelas divididas, siendo la parcela grande, el tratamiento de irrigación y, la parcela chica la aplicación del fertilizante. Se aplicaron 11 g de KBr en 60 pequeñas parcelas de  $0.3 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$ , lo cual representa una dosis de  $200 \text{ kg ha}^{-1}$ . Esta dosis representa el valor que más se usa en estudios de evaluación con  $\text{Br}^-$  (Onken *et al.*, 1977; Rice *et al.*, 1986, 1991; Kung, 1990; Agus y Cassel, 1992; Iragavarapu *et al.*, 1998). El KBr se aplicó dos días antes de la primera irrigación en ambos tratamientos. Las dimensiones de las parcelas se redujeron para evitar la contaminación con  $\text{Br}^-$  de toda el área de estudio. Las parcelas se ubicaron por tratamiento. Treinta parcelas se instalaron en el surco seco del tratamiento de riego alternado y otras treinta en un surco humedecido por riego continuo. Las parcelas se distribuyeron a lo largo del surco (cinco) y entre surcos (12). Todas las parcelas se georeferenciaron. Dada la naturaleza continua del movimiento del  $\text{Br}^-$  en el suelo, lo que implica la necesidad de muestrear el suelo continuamente y a diferentes profundidades, para con ello tratar de localizar la concentración pico y el avance de la lixiviación del  $\text{Br}^-$ , se procedió a evaluarlo de manera discreta, con lo que se logró reducir el número de muestreos y costos. Esto determinó la necesidad de establecer *a priori* las profundidades de exploración de manera diferenciada para cada tratamiento y para cada muestreo que se realizó a lo largo del ciclo de cultivo del maíz, considerando que, en el tratamiento de irrigación alternada, el KBr se aplicaría en el surco seco, donde habría menor movilidad, y que, en el surco humedecido por el tratamiento de riego continuo, la lixiviación sería mayor. El primer muestreo se realizó después del primer riego, el segundo después del tercer riego y el tercer muestreo después de la cosecha del cultivo de maíz (145 días después de la aplicación del  $\text{Br}^-$ ). La profundidad máxima explorada después del primer riego fue de 0.91 m, de 1.52 m después del tercer riego y de

1.83 m para el muestreo realizado después de la cosecha en el tratamiento de riego continuo. Con riego alternado, las profundidades máximas fueron de 0.91, 1.21 y 1.51 m del primer al tercer muestreo, respectivamente. Las profundidades intermedias fueron cuatro en cada muestreo y sus niveles variaron de acuerdo con la profundidad máxima. La irrigación consistió en una lámina de 5 cm, utilizando un sistema controlado por una válvula surge LVC-5 (Waterman Inc, Exeter, CA). La concentración de  $\text{Br}^-$  se determinó por cromatografía.

Los resultados se analizaron por medio de dos tipos de gráficas: el análisis del cambio de concentraciones en términos relativos y la reconstrucción del movimiento de  $\text{Br}^-$ . Cada gráfica e imagen representan las concentraciones de  $\text{Br}^-$  de 30 sitios. Las gráficas de movimiento relativo fueron una relación del cambio de concentración por profundidad en las que se relacionaron los tres muestreos en cada gráfica y, con ellas, se localizó la posición de la concentración pico de  $\text{Br}^-$ . La fórmula usada fue (Van de Pol *et al.*, 1977):

$$C_R = \frac{C - C_i}{C_0 - C_i}$$

donde:  $C_R$  = concentración relativa (intervalo de 0 a 1);  $C$  = concentración a la profundidad de muestreo;  $C_i$  = concentración inicial;  $C_0$  = concentración máxima a la profundidad de muestreo.

Para generar las visualizaciones volumétricas, se realizaron interpolaciones de los valores de concentración de  $\text{Br}^-$ . Se ajustó un modelo espacial para cada profundidad estudiada. El modelo se usó para interpolar los datos por Kriging (Isaaks y Srivastava, 1989). Kriging es un método para interpolar datos no muestreados y se basa en un semivariograma. El semivariograma es una medida estadística estándar de variación espacial como una función de las distancias entre observaciones (Isaaks y Srivastava, 1989). Se calculó para cada tratamiento y para cada profundidad un semivariograma con el paquete  $\text{GS}^+$  (Robertson, 1998). Con el semivariograma se estimaron los valores no muestreados y con ellos fue posible simular un solo tratamiento de irrigación para cada muestreo.

Para realizar la reconstrucción, se ordenaron los valores interpolados de  $\text{Br}^-$  en forma vertical. Este orden se realizó de acuerdo con la profundidad a

la que se colectó cada muestra y a los niveles en que se subdividió cada una, que fueron cuatro capas o niveles, para cada uno de los tres muestreos. Para la reconstrucción vertical se utilizó el programa IDL (Research Systems, 1997). La reconstrucción se basa en un algoritmo que considera la creación de una lista de vértices y polígonos que describen la superficie (contorno). Después se genera una serie de valores de tonos o sombras, ordenadas de acuerdo con la magnitud de los valores presentes en cada contorno. Las sombras se generan a partir de un rayo de luz, cuya fuente de luz es estimada de acuerdo con el algoritmo desarrollado por Foley y Van Dam (1982), el cual es:

$$L = L_a + dL_p(L \cdot N)$$

donde:  $L$  = fuente de luz;  $L_a$  = término debido a la luz ambiente;  $d$  = término debido a la profundidad de campo y brillantez. La profundidad normalizada es  $d = (z+2)/3$ , en un intervalo de 0 a 1;  $L_p(L \cdot N)$  = término debido a reflexión difusa. La luz reflejada es proporcional al coseno del ángulo de la superficie del vector normal ( $N$ ) y el vector que apunta desde la fuente de luz, ( $L$ ),  $L_p$  es aproximadamente 0.9.

El siguiente paso es calcular el valor de la sombra que se presenta en cada vértice de polígono. Después, las sombras se interpolan a lo largo de los bordes de cada polígono, para producir una interpolación vertical de sombras entre contornos que reconstruyeron el movimiento del  $\text{Br}^-$  muestreado a diferentes profundidades. El volumen reconstruido de esta forma permite la visualización y ubicación de la concentración pico, así como su estructura. En cada imagen se logra un mayor realismo con una cierta densidad de datos máxima, la cual representa el rango de valores que predominan en la imagen. Los volúmenes reconstruidos se relacionaron con otra información, como textura y clase de suelo para explicar el movimiento del  $\text{Br}^-$  y validar el realismo de la imagen en un área de 6.5 ha.

Para verificar el realismo de la imagen reconstruida, se relacionó una cierta área del sitio de estudio en el cual se detectó un estrato arenoso, donde el  $\text{Br}^-$  se movió de manera preferencial (Yoder y Duke, 1990). Para esto, se usó como referencia el movimiento del  $\text{Br}^-$  comparado con la infiltración máxima del agua con el supuesto del modelo del pistón (Addiscott *et al.*, 1991), el cual establece el movimiento máximo del agua, de acuerdo con:

$$Z_p = \frac{Q}{\theta}$$

donde:  $Z_p$  = la profundidad a la que el frente de desplazamiento de la solución penetra;  $Q$  = cantidad de agua o solución que está haciendo el desplazamiento;  $\theta$  = contenido de humedad en volumen.

Otros estudios demostraron que los trazadores conservativos -su movilidad no es afectada significativamente por reacciones químicas con arcillas- se mueven de manera cercana a como el modelo del pistón lo establece (Silvertooth *et al.*, 1992).

Los valores calculados con el uso del modelo del pistón se compararon con los valores estimados con ayuda del modelo reconstruido. Los valores de humedad en volumen se obtuvieron del monitoreo de humedad realizado a lo largo del ciclo de cultivo por medio de un dispersor de neutrones. Para conocer la lámina de agua infiltrada en una posición determinada a lo largo del surco, se utilizó el modelo algebraico desarrollado por Fekersillassie y Eisenhauer (2000), el cual es un modelo que permite estimar la lámina infiltrada a lo largo del surco cuando se usa el método de riego controlado por una válvula alternante (válvula surge). El modelo usa variables como el gasto por surco, el tiempo de avance, el tiempo total de riego, el tiempo de riego post avance, la tasa de infiltración básica, la relación de flujo, el cual es el gasto por surco hasta alcanzar la velocidad de infiltración básica multiplicada por la longitud del surco, además de otras características de suelo, como: pendiente, ancho y largo del surco, forma del surco y coeficiente de rugosidad de Manning (Chow, 1986). Los valores relativos al riego y a las características físicas del terreno se midieron para alimentar el algoritmo.

Una segunda forma de verificar si las imágenes reconstruidas corresponden a la realidad fue mediante el uso de valores reales de  $\text{NO}_3\text{-N}$ , los cuales se determinaron un mes antes del establecimiento del experimento, con fines distintos a este estudio. Los datos se obtuvieron de una cuadrícula de 480 puntos distribuidos en las 6.5 ha y se colectaron a una profundidad de 0 a 20 cm y de 20 a 80 cm. Los valores de  $\text{NO}_3\text{-N}$  se reconstruyeron también y representan el nitrógeno (N) presente en el suelo antes de la siembra, con una distribución espacial que es la típica en el terreno de estudio cuando se aplica el riego de surco continuo. Si la imagen reconstruida de

$\text{Br}^-$  muestra una estructura y una distribución semejante a la que se visualiza del contenido total de  $\text{NO}_3\text{-N}$  antes de la siembra, entonces la imagen del trazador representará aproximadamente el comportamiento del  $\text{NO}_3\text{-N}$  en su movimiento hacia la zona radical y más allá al presentar una estructura y distribución espacial semejante, en especial, en condiciones de flujo preferencial localizadas en el extremo del terreno.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La profundidad a la que se movió el  $\text{Br}^-$ , determinado éste por la ubicación de la concentración pico de  $\text{Br}^-$ , con riego de surco alternado se localizó a 7 cm después de siete días de la aplicación de  $\text{KBr}$  y un primer riego (Figura 1). Al mismo tiempo, con riego continuo, la concentración pico de  $\text{Br}^-$  se localizó a 15 cm (Figura 2). Después de 40 días de la aplicación de  $\text{KBr}$  y tres riegos, la concentración pico de  $\text{Br}^-$  se encontró a 15 cm con riego por surco alternado y a 61 cm con riego de surco continuo (Figuras 3 y 4).

Después de 145 días de la aplicación de  $\text{KBr}$  y cuatro riegos y lluvias postcosecha, la concentración pico  $\text{Br}^-$  se encontró a 61 cm para riego alternado y a 122 cm para riego por surco continuo.

Por otro lado, la Figura 3 presenta la variación del movimiento de  $\text{Br}^-$  a lo largo del surco (293 m), después de 40 días de la aplicación de  $\text{Br}^-$  y tres riegos de auxilio de 5 cm de lámina. La concentración

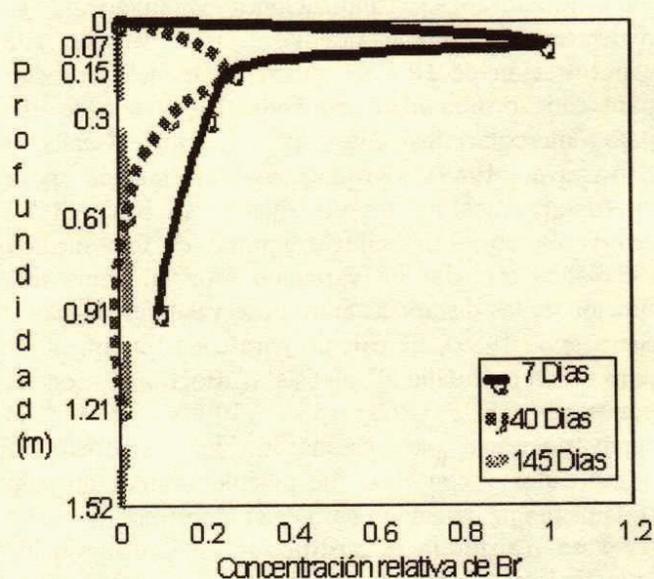


Figura 1. Concentración relativa promedio de  $\text{Br}^-$  con riego por surco alternado.

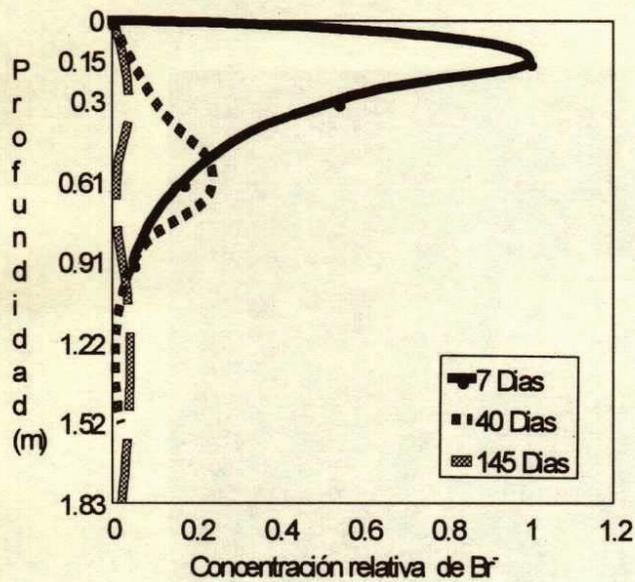


Figura 2. Concentración relativa promedio de  $\text{Br}^-$  con riego por surco continuo.

pico de  $\text{Br}^-$  se localizó a 15 cm con riego alternado, tanto al inicio, como al final del surco. En cambio, con riego de surco continuo, al inicio del surco se localizó la concentración pico a 30 cm de profundidad y al final del surco a 15 cm (Figura 4). En la información que proporcionan las Figuras 1 a 4 es evidente que el contenido representa un promedio de valores, los cuales corresponden a sitios distribuidos en un plano, y que, sin embargo, dichas gráficas

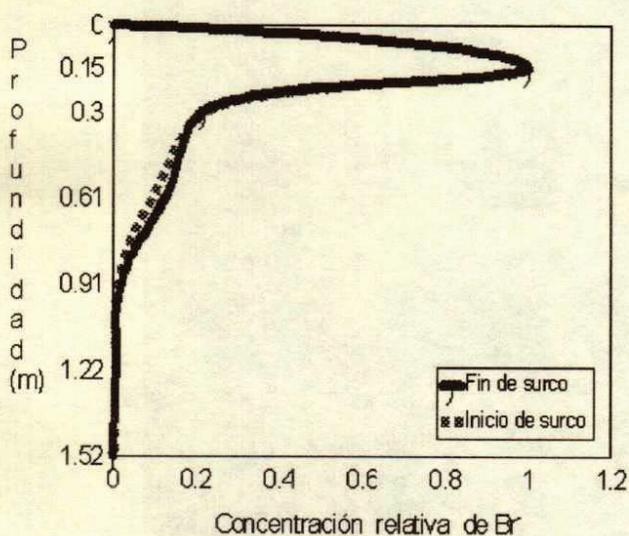


Figura 3. Concentración relativa promedio de  $\text{Br}^-$  en sitios de muestreo localizados al inicio y fin del surco con riego por surco alternado, después de 145 días de la aplicación de  $\text{Br}^-$ .

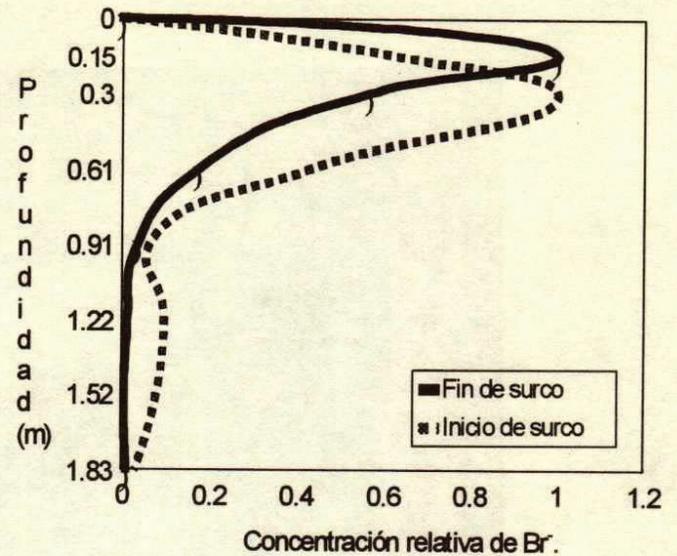


Figura 4. Concentración relativa promedio de  $\text{Br}^-$  en sitios de muestreo localizados al inicio y fin del surco con riego por surco continuo, después de 145 días de la aplicación de  $\text{Br}^-$ .

resultan inapropiadas, dada su naturaleza bidimensional para mostrar la variación espacial, tanto horizontal, como vertical. De igual manera, la generación de gráficas por sitio impide apreciar la continuidad del indicador estudiado y, aunque fuera posible llevar a cabo lo anterior, tendría una magnitud que impediría el manejo de las mismas.

Las Figuras 5 y 6 corresponden a dos imágenes reconstruidas de los 30 sitios estudiados para el tratamiento de riego por surco alternado. La Figura 5 representa la distribución del  $\text{Br}^-$  en la capa superior del suelo (7 cm), después del primer riego, y la Figura 6 es la imagen de la distribución espacial del  $\text{Br}^-$  a una profundidad de 15 cm, después de la aplicación del tercer riego.

Un detalle importante de la Figura 5 es la presencia de una serie de ocho valores de  $\text{Br}^-$  de alta concentración, ubicados a profundidades de hasta 90 cm y alineados en la parte Oeste del terreno, en el tratamiento de riego alternado. Dado que en el riego alternado, el muestreo se realizó en el surco seco, donde no se aplicó agua que pudiera trasladar el  $\text{Br}^-$  hasta dicha profundidad, tales valores altos se asociaron con un error de muestreo realizado en esta parte del terreno, al inicio del primer muestreo. El error consistió en que, en el momento de muestreo, se utilizó una barrena defectuosa, la cual no retenía la muestra de suelo y logró contaminar con  $\text{Br}^-$  proveniente de las capas superiores, las muestras de los estratos subsecuentes. El problema se detectó en

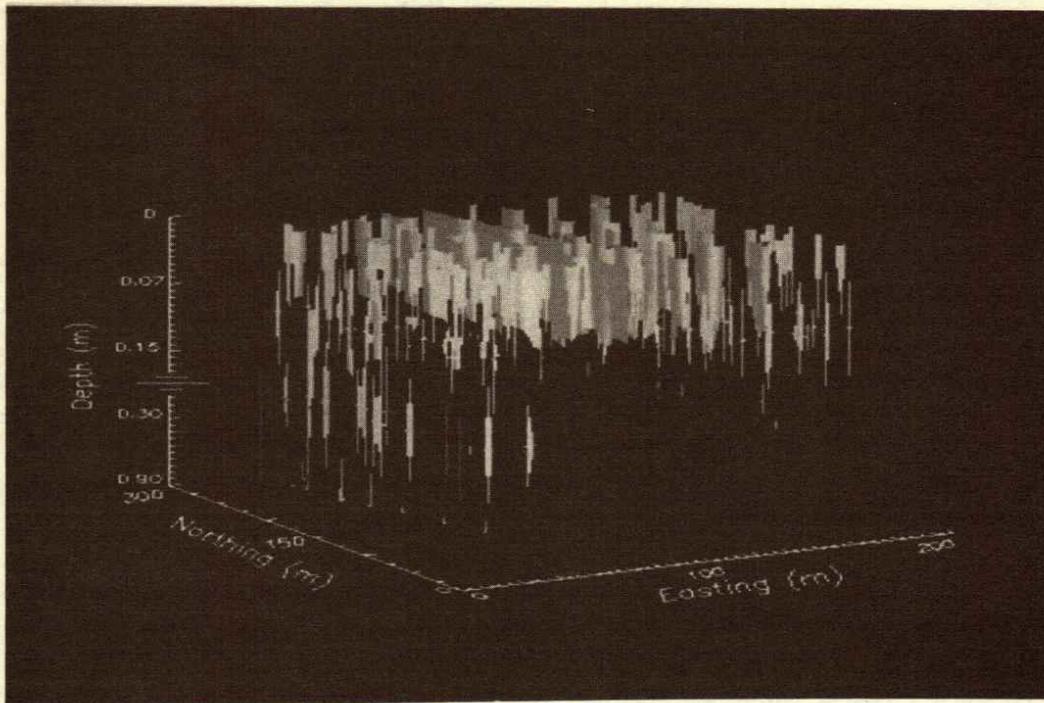


Figura 5. Imagen reconstruida del movimiento de  $\text{Br}^-$  con riego por surco alternado, siete días después de la aplicación. La concentración pico de  $\text{Br}^-$  se localizó a 7 cm de profundidad.

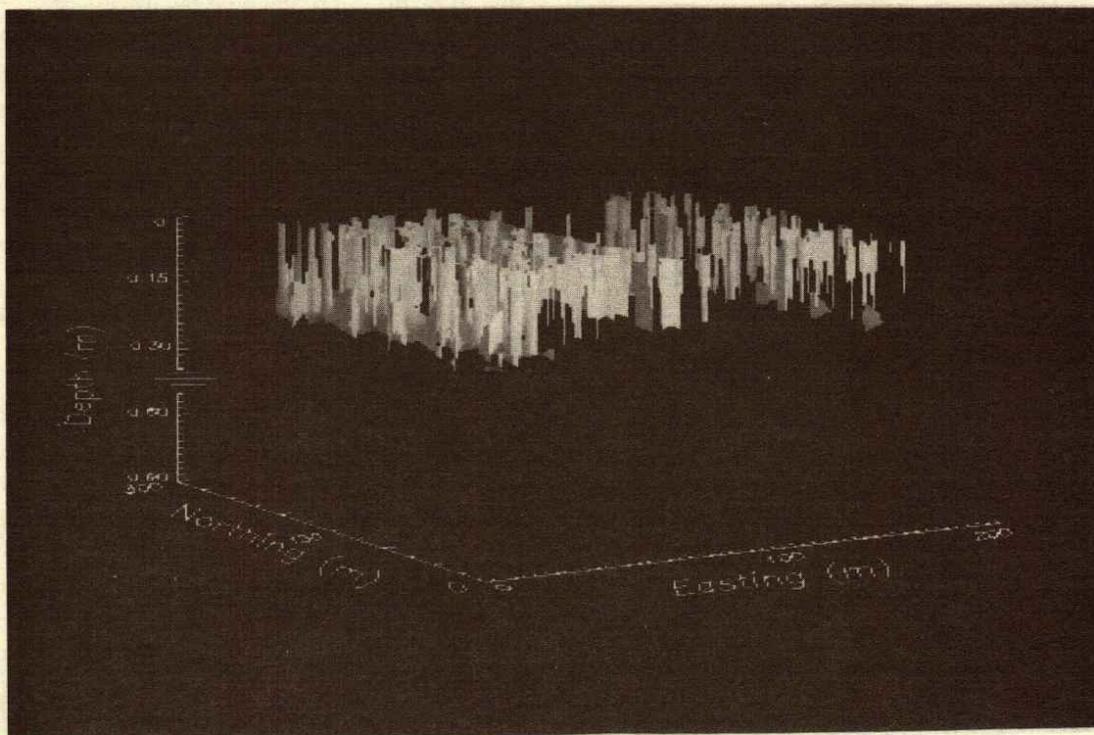


Figura 6. Imagen reconstruida del movimiento de  $\text{Br}^-$  con riego por surco alternado 40 días después de la aplicación. La concentración pico de  $\text{Br}^-$  se localizó a 15 cm de profundidad.

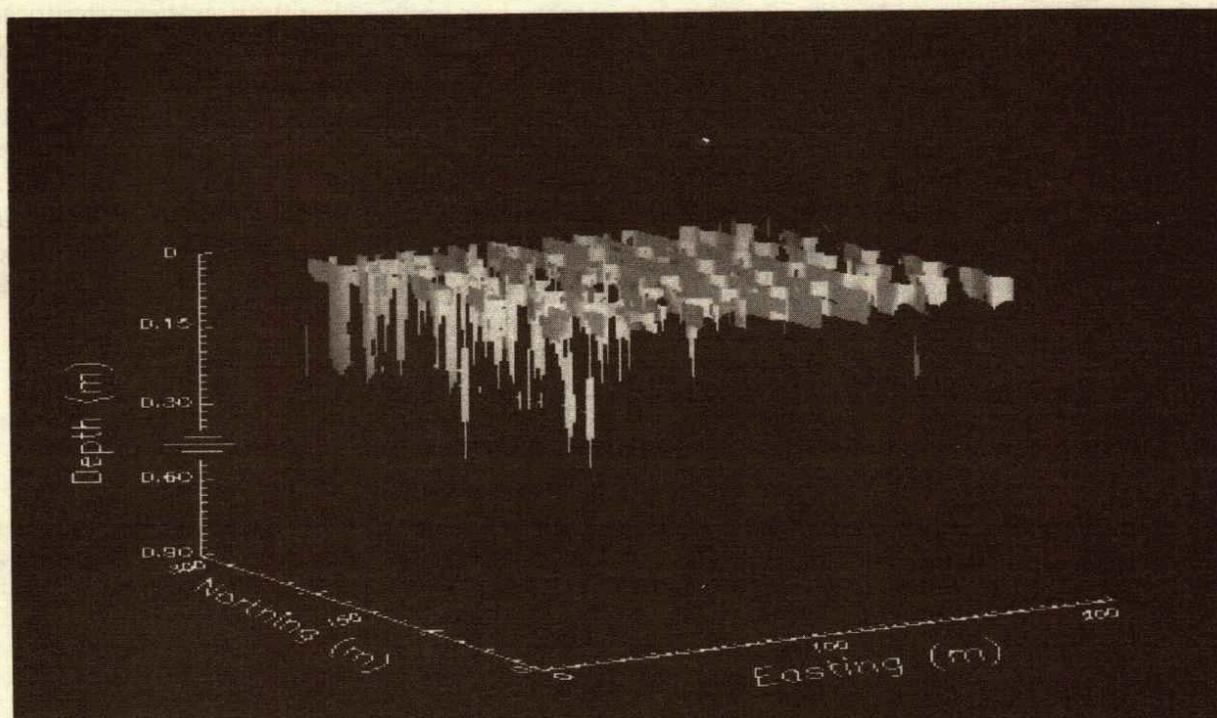


Figura 7. Imagen reconstruida del movimiento de  $\text{Br}^-$  con riego por surco continuo siete días después de la aplicación. La concentración pico de  $\text{Br}^-$  se localizó a 15 cm de profundidad.

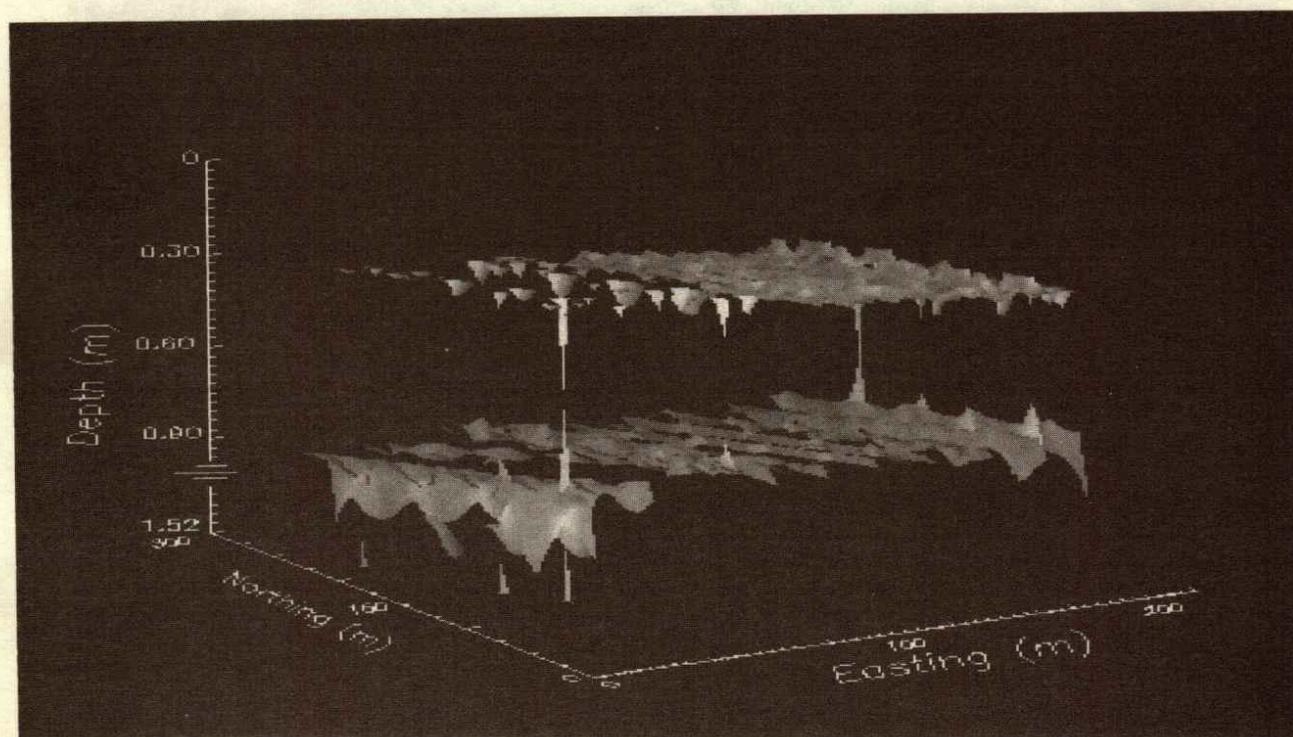


Figura 8. Imagen reconstruida del movimiento de  $\text{Br}^-$  con riego por surco continuo 40 días después de la aplicación. La concentración pico de  $\text{Br}^-$  se localizó a 61 cm de profundidad.

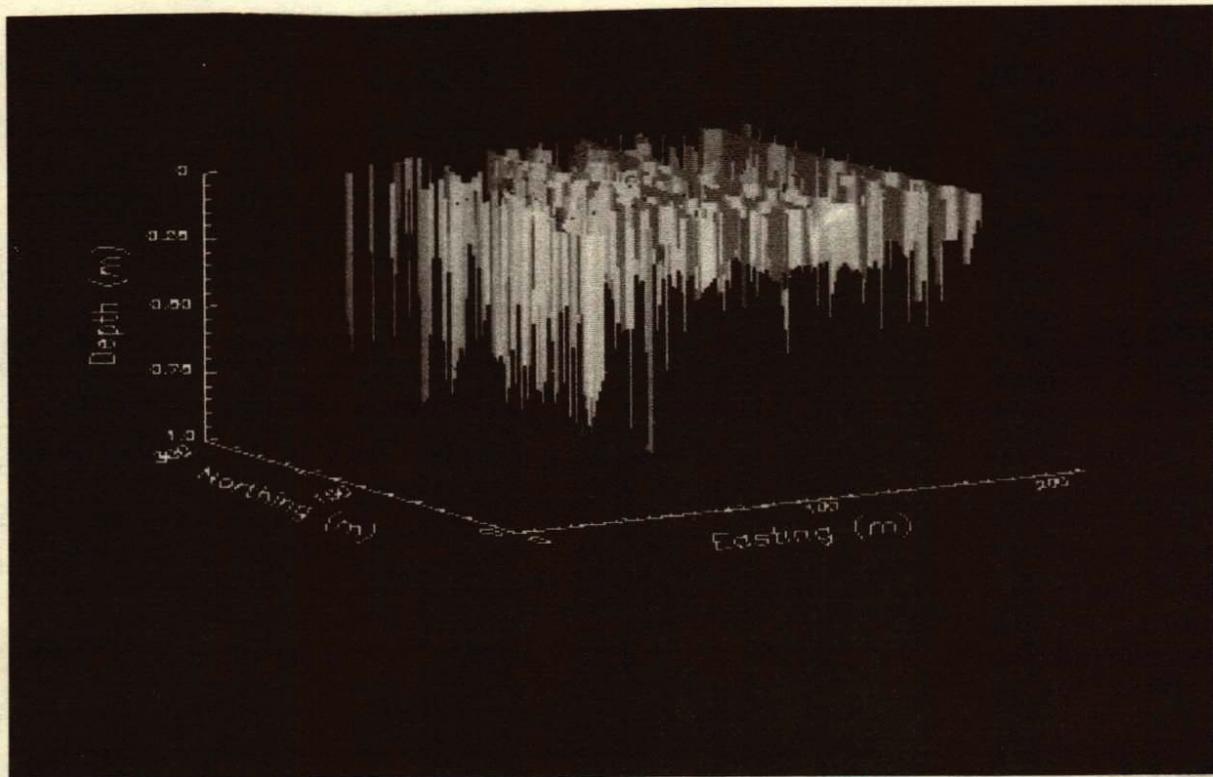
el octavo sitio de muestreo y éste se corrigió al cambiar de barrena. Sin embargo, este error sirve para apreciar la ventaja de las imágenes reconstruidas. En las graficas convencionales, al promediar estos valores, es imposible detectar un error de esta índole.

Las Figuras 7 y 8 son las imágenes correspondientes al tratamiento de riego por surco continuo. La Figura 7 refleja un movimiento del pico de concentración de 15 cm y la segunda imagen (Figura 8) representa el movimiento de Br<sup>-</sup> después de tres riegos, donde el pico de la concentración de Br<sup>-</sup> se localiza a 61 cm.

Además de permitir reconocer la distribución espacial, es posible identificar otras características del movimiento del Br<sup>-</sup> que, de otra manera, no hubieran sido evidentes. En la Figura 8, se observa un movimiento más profundo del Br<sup>-</sup> en el extremo Oeste del terreno. Allí existe un suelo más arenoso (estrato de arena fina entre 0.38 a 1.54 m de profundidad) que permitió el movimiento de Br<sup>-</sup> a mayor profundidad. En el Cuadro 1, se presenta la comparación de los valores observados con los esperados cuando el modelo del pistón es aplicado.

**Cuadro 1. Lámina de agua infiltrada, profundidad de desplazamiento con el modelo del pistón y profundidad de la concentración pico del Br<sup>-</sup> después del primer riego en sitios cercanos a la entrada y salida del surco con dos tratamientos de irrigación.**

Rep.	Infiltración		Modelo pistón (Z <sub>p</sub> )		Concentración pico de Br <sup>-</sup>			
	Inicio	Salida	Inicio	Salida	Riego continuo		Riego alternado	
					Inicio	Salida	Inicio	Salida
----- mm -----								
1	79	66	239	200	152	152	76	76
2	82	69	248	209	304	304	76	76
3	73	61	221	184		---	---	---
4	86	72	260	218	304	152	76	76



**Figura 9. Imagen reconstruida de la concentración de NO<sub>3</sub>-N previa a la fertilización.**

Existe evidencia (Silvertooth *et al.*, 1992) que un trazador de tipo conservativo como el Br<sup>-</sup> se comporta como lo representa el modelo del pistón. El Cuadro 1 presenta los valores de Br<sup>-</sup> ubicados en la segunda repetición del experimento (extremo Oeste), coincidiendo con lo que se presenta en las imágenes.

En la parte Este del terreno (Figura 8), se observa una capa de Br<sup>-</sup> que aún se localiza dentro del área radicular. Esto sucede sólo para una porción del terreno, lo cual es difícil de percibir en gráficas simples.

Una forma adicional de verificar el comportamiento del movimiento de Br<sup>-</sup> fue la comparación con el movimiento de NO<sub>3</sub>-N, de los cuales el Br<sup>-</sup> es el trazador. Con datos del contenido total de NO<sub>3</sub>-N que provinieron de una cuadrícula de 480 sitios y dos profundidades obtenidos en el mismo sitio de estudio, se reconstruyó la Figura 9. El movimiento presentado por NO<sub>3</sub>-N es independiente del mostrado por Br<sup>-</sup>, ya que corresponde al NO<sub>3</sub>-N residual y recientemente mineralizado, previo a la siembra. Sin embargo, en la Figura 9, se observa un movimiento de NO<sub>3</sub>-N más profundo en la parte Oeste del terreno, donde previamente se detectó el movimiento más profundo de Br<sup>-</sup>. Éste se localiza en la misma posición del terreno arenoso, el cual se detectó en las imágenes reconstruidas para Br<sup>-</sup>, con lo que se verifica el apego a la realidad de las imágenes, tanto al simular el movimiento de NO<sub>3</sub>-N, como la información detallada que proporciona. Esto muestra las ventajas de las imágenes reconstruidas como un medio para explicar con detalle las características propias del terreno y da oportunidad de recomendar acciones de mayor precisión en cada terreno.

### CONCLUSIONES

- Las imágenes reconstruidas mediante la técnica de visualización volumétrica integran gran cantidad de datos lo que facilita el análisis y la identificación de discontinuidades del fenómeno estudiado al representar la estructura y distribución espacial de Br<sup>-</sup> en el suelo.
- Es posible corroborar el realismo de las imágenes reconstruidas mediante atributos físicos que puedan georeferenciarse y asociarse a la imagen.

### LITERATURA CITADA

- Addiscott, T.M., A.P. Whitmore y D.S. Powlson. 1991. Farming, fertilizers and the nitrate problem. CABI-Rothamsted Experimental Station. Harpenden, UK.
- Agus, F.A. y D.K. Cassel. 1992. Field-scale bromide transport as affected by tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 254-260.
- Chow, V.T. 1986. Open channel hydraulics. Mc Graw-Hill. Boston, MA.
- Engberg, R.A. y R.F. Spalding. 1978. Groundwater quality atlas of Nebraska. Resource Atlas 3. Nebraska Water Resources Center-University of Nebraska-Conservation and Survey Division. Lincoln, NE.
- Fekersillassie, D. y D.E. Eisenhauer. 2000. Feedback controlled surge irrigation: I. model development. *Trans. ASAE* 43: 1621-1630.
- Foley, J.D. y A. van Dam. 1982. Fundamentals of interactive computer graphics. Addison-Wesley. Reading, MA.
- Helly, J.J. y K.T. Herbinson. 1994. Visualization of the salinity plume from a coastal ocean water desalination plant. *Water Environ. Res.* 66: 753-758.
- Iragavarapu, T.K., J.L. Posner y G.D. Bubenzer. 1998. The effect of various crops on bromide to shallow groundwater under natural rainfall conditions. *J. Soil Water Conserv.* 53: 146-151.
- Isaaks, E.H. y R.M. Srivastava. 1989. Applied geostatistics. Oxford University Press. New York.
- Kung, K.J.S. 1990. Influence of plant uptake on the performance of bromide tracer. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 975-979.
- Onken, A.B., C.W. Wendt, R.S. Hargrove y O.C. Wilke. 1977. Relative movement of bromide and nitrate in soils under three irrigation systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41: 50-52.
- Perret, J., S.O. Prasher, A. Kantzas y C. Langford. 1999. Three-dimensional quantification of macropore networks in undisturbed soil cores. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1530-1543.
- Research Systems Inc. 1997. Using IDL (Interactive Data Language). Version 5.0. Boulder, CO.
- Rice, R.C., R.S. Bowman y D.B. Jaynes. 1986. Percolation of water below an irrigated field. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 855-859.
- Rice, R.C., D.B. Jaynes y R.S. Bowman. 1991. Preferential flow of solutes and herbicides under irrigated fields. *Trans. ASAE* 34: 914-918.
- Ritsema, C.J., L.W. Dekker y A.W.J. Heijs. 1997. Three-dimensional fingered flow patterns in a water repellent sandy field soil. *Soil Sci.* 162: 79-90.
- Robertson, G.P. 1998. GS<sup>+</sup>: Geostatistics for the environmental sciences. Gamma Design Software. Plainwell, MI.
- Silvertooth, J.C., J.E. Watson, J.E. Malcuit y T.A. Doerge. 1992. Bromide and nitrate movement in an irrigated cotton production system. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 548-555.
- Stevenson, F.J. 1986. Cycles of soil: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur and micronutrients. John Wiley. New York.
- USDA (US Department of Agriculture). 1978. Soil survey of Lincoln County, Nebraska. Soil Conservation Service-University of Nebraska-Conservation and Survey Division. Lincoln, NE.
- Van de Pol, R.M., P.J. Wierenga y D.R. Nielsen. 1977. Solute movement in a field soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41: 10-13.
- Yoder, R.E. y H.R. Duke. 1990. Non-darcy flow and drainage from irrigated furrows. *Trans. ASAE* 33: 1487-1491.