

TRANSPORTE DE CLORURO EN ACUIFEROS ALUVIALES

Jacqueline Köhn⁽¹⁾, ***Eduardo E. Kruse***⁽²⁾ y ***Juan E. Santos***⁽³⁾

(1) CONICET, Departamento de Geofísica Aplicada, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, Paseo del Bosque S/N, 1900 La Plata, Argentina
e-mail: jkohn@fcaglp.edu.ar

(2) CONICET, Departamento de Geofísica Aplicada, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, Paseo del Bosque S/N, 1900 La Plata, Argentina
e-mail: kruse@fcaglp.edu.ar

(3) CONICET, Departamento de Geofísica Aplicada, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, Paseo del Bosque S/N, 1900 La Plata, Argentina
e-mail: santos@fcaglp.edu.ar y Department of Mathematics, Purdue University, West Lafayette, IN 47907, USA. e-mail: santos@math.purdue.edu.

RESUMEN

Como parte de un extenso trabajo de campo y simulación numérica diseñado a testear modelos de flujo subterráneo y transporte de solutos en una zona semiárida en la Provincia de Salta (Argentina), diversos experimentos se han llevado a cabo. En este trabajo se ha caracterizado un acuífero de alta conductividad hidráulica por medio de un método geoestadístico, Kriging. Para ello se analizaron datos de pozos, los cuales reflejaron el tipo de litología presente en el área de estudio y las características químicas del agua.

Debido a las variaciones observadas en las concentraciones de cloruro se ha elegido dicho elemento para el estudio de su distribución espacial en presencia de heterogeneidades físicas en el medio acuífero. La capacidad de obtener, tanto matemáticamente como numéricamente, la distribución de parámetros dentro de un medio hidrogeológico es un problema central en el modelado de flujo subterráneo y fenómenos de transporte. Es de especial interés la caracterización espacial del campo de la conductividad hidráulica.

La evolución en el tiempo de un sistema representa una de las aplicaciones más importante de conceptos estocásticos en hidrología, por lo tanto es de interés el análisis de la migración de cloruro en el medio poroso saturado. Para el desarrollo del simulador de flujo de agua subterránea se empleó el método mixto de Elementos Finitos, mientras que para simular el transporte de cloruro el método de Características.

Los resultados obtenidos indican que la técnica de kriging ha representado con una buena aproximación a la geología del subsuelo, particularmente el campo de conductividad hidráulica. Con respecto a los patrones de concentración de cloruro, éstos se desplazan en dirección del flujo y los métodos numéricos empleados resultaron apropiados para la descripción de la evolución del fenómeno de transporte.

ABSTRACT

As part of an extensive field study and numerical simulation designed to model groundwater flow and solute transport in a semiarid region in the Province of Salta (Argentina), several experiments have been performed. In this paper an aquifer of high hydraulic conductivity has been characterized by means of a geostatistic method, Kriging. For this purpose well data were analyzed, which reflected the type of lithology present in the area under study and the chemical characteristics of the water.

Due to the observed variations in the concentrations of chloride, this element has been chosen for the study of their space distribution in presence of physical heterogeneities in the aquifer medium. The capacity to obtain, both mathematically as numerically, the distribution of parameters of a hydrogeological medium is a central problem in the modeling of groundwater flow and transport phenomena. It is of special interest the space characterization of the hydraulic conductivity field.

The time evolution of a system represents one of the most important applications in stochastic concepts in hydrology; therefore it was of interest the analysis of the migration of chloride in the saturated porous media. The groundwater flow simulator was designed using a mixed Finite Element Method, while to simulate the transport of chloride the Method of Characteristic was employed.

The obtained results indicate that the kriging technique has represented quite accurately the geology of the subsurface, particularly the hydraulic conductivity field. The patterns of concentration of chloride migrate in the flow direction and the chosen numerical method it is known to provide good approximate solutions to describe the transport phenomena.

Introducción

Un modelo hidrogeológico requiere detallado conocimiento de la estructura geológica del acuífero y sus parámetros de flujo y transporte.

Los acuíferos aluviales se caracterizan por presentar fuertes variaciones en la conductividad hidráulica en cortas distancias. Consecuentemente se requieren un gran número de perforaciones, interpolar o extrapolar información de los perfiles de pozos disponibles y por lo tanto trabajar con alta incerteza en el modelado hidrogeológico.

La conductividad hidráulica resulta una variable básica para definir el flujo de agua subterránea, que representa una variabilidad espacial no es puramente random: existe una clase de correlación en la distribución espacial de dichas magnitudes (Marsily, 1990).

Valores vecinos de conductividad hidráulica están espacialmente autocorrelacionados (estadísticamente dependientes). Se asume que las variaciones espaciales son descritas por un proceso estadísticamente homogéneo estocástico. Estadísticamente homogéneo significa que la conductividad hidráulica tiene el mismo valor esperado en cada punto dentro del dominio de flujo y que la covarianza entre las conductividades hidráulicas vecinas es dependiente sólo del vector que separa los puntos y no de su posición absoluta. Por lo tanto las variaciones de la conductividad están descritas por un proceso estocástico en cualquier lugar dentro del dominio de flujo. (Smith L. and Schwartz F, 1981).

Otro problema central para hidrogeólogos es predecir la evolución en el tiempo de una pluma de un contaminante cuya historia pasada no es conocida. La información disponible es el campo de contaminación presente en el medio poroso a través de información de pozos y la caracterización espacial del flujo subterráneo y la composición litológica del medio.

El objetivo de este trabajo es modelar la distribución de la conductividad hidráulica en un corte transversal del acuífero aluvial de la Cuenca del Río Mojotoro, Provincia de Salta, Argentina, a

través de técnicas estadísticas y estudiar cómo en ese medio se propaga una pluma de cloruro proveniente de una fuente puntual.

Desarrollo

Modelos numéricos de flujo de agua subterránea y transporte de solutos son utilizados para investigar problemas del medio ambiente tales como contaminación de aguas subterráneas.

Numerosos estudios de flujo y transporte en medios porosos heterogéneos frecuentemente cuentan con campos de conductividad hidráulica sintéticamente generados (Burr et al., 1994; Dagan G, 1990).

El modelo conceptual o la ecuación gobernante utilizada para representar el transporte de solutos en sistemas hidrogeológicos es la ecuación de advección-convección. El parámetro de dispersividad, el cual es una medida de las propiedades dispersivas del sistema, ha sido tradicionalmente considerado una propiedad monovaluable de todo el medio. En años recientes, varios estudios sugirieron que la dispersividad no es constante, y que depende de la distancia media o de la escala del sistema (Gelhar L. W. and C. L. Axness, 1983; Pickens J. and Grisak G., 1981).

La ecuación generalizada para describir el transporte de solutos en medios porosos saturados en dos dimensiones:

$$(1) \quad \frac{fC}{ft} + (D \nabla^2 C) - q \cdot \nabla C = f$$

donde

- f porosidad
- C concentración de contaminante
- D coeficiente de dispersión
- q velocidad de Darcy de flujo subterráneo
- f fuente de contaminación

Las componentes del tensor de dispersión hidrodinámica D incluyen el efecto de dispersión mecánica y difusión molecular.

El método de características fue utilizado para determinar una aproximación a la solución de (1) sujeto a apropiadas condiciones iniciales y de borde (Köhn et al, 1998). Esta técnica permite eliminar la no-simetría de los operadores debido a la advección.

Para obtener el campo de flujo subterráneo se parte de la ley de Darcy generalizada:

$$(2) \quad q = -\frac{k}{\mu} (p + g z)$$

donde k es la permeabilidad específica, μ es la viscosidad dinámica del fluido, g la gravedad y ρ la densidad del fluido.

La conductividad hidráulica K es una constante que depende del medio poroso y de las características y propiedades del fluido. Es igual a la permeabilidad específica k excepto un factor de escala. La relación entre k y K está dada por

$$(3) \quad K = \frac{k \rho g}{\mu}$$

El sistema que se resuelve para obtener el campo de flujo de aguas subterráneas bajo la hipótesis de incompresibilidad es el siguiente:

$$(4) \quad \nabla \cdot q = 0$$

donde q satisface la ley de Darcy.

Es esencial definir precisamente el sistema de flujo para simular el transporte y permitir el posicionamiento correcto de la pluma dentro del acuífero. Si la masa de agua se conserva en cada elemento, entonces la divergencia del campo de velocidad sobre cada uno es cero.

Para el desarrollo del simulador de flujo de agua dentro del medio poroso saturado se empleó un método mixto de Elementos Finitos.

Este programa permite obtener el campo de velocidad de flujo subterráneo teniendo en cuenta las variaciones del mismo para su inclusión en las ecuaciones que gobiernan la concentración de contaminantes.

Basándose en datos de campo y con el uso de herramientas geoestadísticas se computa la distribución de la conductividad hidráulica.

Aplicación y Resultados

Se ha examinado la variabilidad espacial y su evolución en el tiempo de plumas de cloruro en un medio poroso saturado de alta conductividad hidráulica, que puede alcanzar valores superiores a 100 m/día.

El área elegida se corresponde a la Cuenca del Río Mojotoro. Desde un punto de vista geológico corresponde a una llanura aluvial. En su constitución prevalece material de granulometría gruesa con alta capacidad de infiltración. Conforman un medio favorable para el flujo subterráneo local y regional. Se reconoce una unidad superior (entre el nivel freático y los 90 m. de profundidad) que

representa un acuífero de alta transmisividad (12000 m/día). El agua subterránea es de baja salinidad (300 a 400 mg/l), lo que indica un corto tiempo de contacto entre agua y sedimento (Kruse, 1994).

El campo de conductividad hidráulica se ha obtenido extrapolando e interpolando datos de pozos ubicados en el área por medio del método de Kriging (Fig. 1). Se ha considerado el caso de una fuente puntual artificial ubicada en el borde superior de la zona saturada que actúa durante 50 días con una concentración inicial C_0 de 2000 mg/l bajo el efecto de un flujo subterráneo variable de izquierda a derecha del dominio, cuya extensión es de 1400 metros y su espesor de 100 metros. El nivel freático se encuentra a una profundidad de 30 metros bajo boca de pozo, que representa una cota de 700 metros sobre el nivel del mar. En las figuras 2, 3 y 4 se puede observar los contornos de concentración normalizada de cloruro C/C_0 luego de 50, 75 y 100 días de transporte a través del medio, respectivamente.

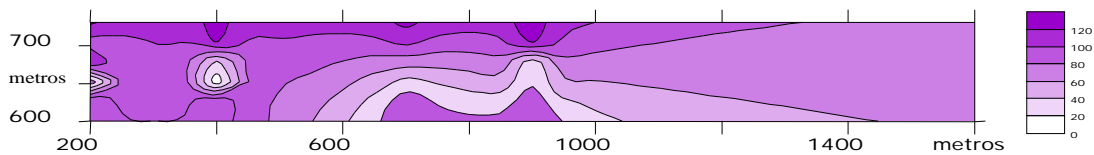


Figura 1. Conductividad hidráulica [m/día] del subsuelo: corte transversal.

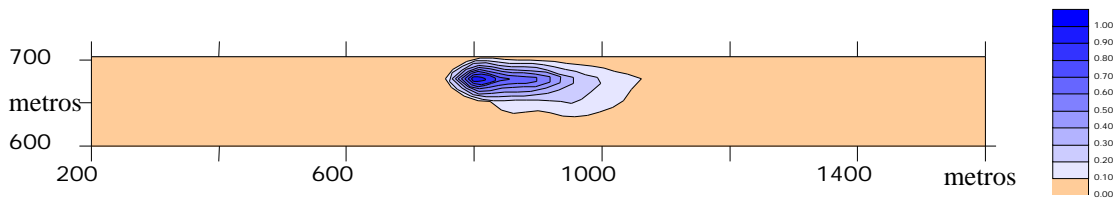


Figura 2. Migración de cloruro luego de 50 días.

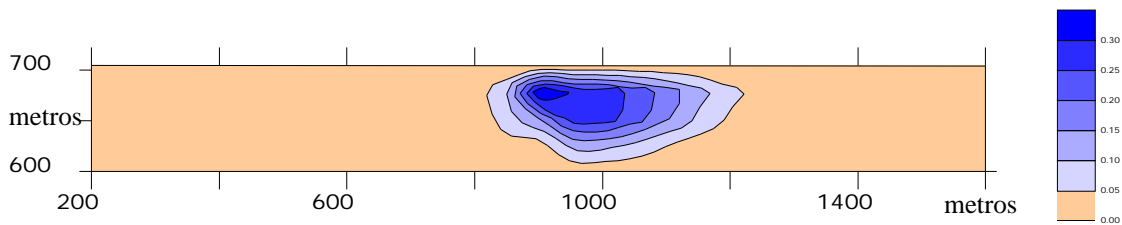


Figura 3. Migración de cloruro luego de 75 días.

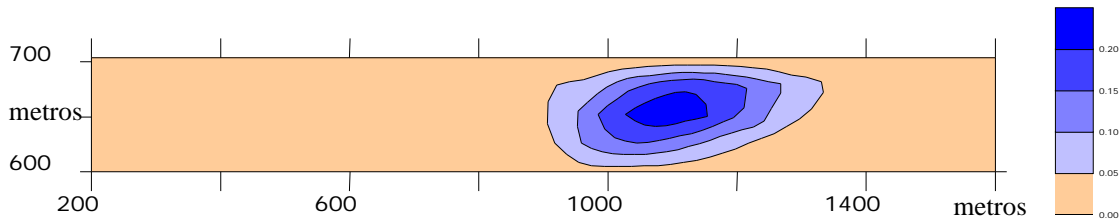


Figura 4. Migración de cloruro luego de 100 días.

Conclusiones

La presencia de heterogeneidades físicas en medios acuíferos es modelada con el uso de descripción geoestadística de la conductividad hidráulica.

Para realizar el modelado de flujos de agua subterránea y transporte de contaminantes se ha formulado y analizado el problema diferencial, y luego de elegir las técnicas numéricas a aplicar, se han desarrollado los simuladores numéricos respectivos, los cuales constituyen una herramienta valiosa para realizar predicciones de la evolución de plumas contaminantes, y describir su posición en el acuífero afectado.

El problema de flujo es resuelto satisfactoriamente utilizando elementos finitos sobre un dominio bidimensional, obteniendo el campo de velocidad utilizando una distribución de conductividad hidráulica generado con métodos geoestadísticos (kriging).

El método de características aplicado a la resolución de la ecuación de transporte, que permite eliminar la asimetría de los operadores debido a la advección, ha conducido a resultados apropiados.

Referencias bibliográficas

Burr D. T. and Sudicky E. A. and Naff R. L.. (1994), Nonreactive and reactive solute transport in three-dimensional heterogeneous porous media: Mean displacement, plume spreading, and uncertainty, *Water Resour. Res.*, 30 (3), 791-815.

Dagan G. (1990), Transport in heterogeneous formations: Spatial moments, ergodicity and effective dispersion, *Water Resour. Res.*, 24(9), 1281-1290.

Gelhar, L. W. and C. L. Axness (1983), Three-dimensional stochastic analysis of macrodispersion in aquifers, *Water Resour. Res.*, 28(7), 1955-1974.

Köhn J., Kruse E. y Santos J., (1998), A TVD Method for contaminant transport in porous media, New Trends and Applications, E. Oñate and S. Idelsohn (Eds.), CIMNE. Barcelona, Spain, 1-8.

Kruse E. E., (1994), Utilización de agua subterránea en una central termoeléctrica de la Pcia. de Salta, Argentina, Actas 2do. Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea, Santiago de Chile, Vol. 1, 407-416.

Marsily Ghislain de (1990), Quantitative hydrogeology, Academic Press Inc., London.

Pickens J. and G. Grisak (1981), Modeling of Scale-Dependent Dispersion in Hydrogeologic Systems, WRR 17 (6), 1701-1711.

Smith L. and F. Schwartz (1981), Mass Transport. 2. Analysis of Uncertainty in Prediction, WRR 17 (2), pp. 351-369.