

MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN LOS SEDIMENTOS PAMPEANOS

Jacqueline Köhn, Eduardo E. Kruse y Juan E. Santos

Conicet, Departamentos de Geofísica Aplicada, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas. Paseo del Bosque S/N
(1900) La Plata, Buenos Aires, Argentina
E-mail: jkohn@fcaglp.fcaglp.unlp.edu.ar

RESUMEN

El propósito de este trabajo fue estimar la probable variabilidad espacial de la conductividad hidráulica de los sedimentos Pampeanos en el NE de la Provincia de Buenos Aires. La influencia de las heterogeneidades en la distribución en el subsuelo de la conductividad hidráulica (K) puede ser expresada por medio de una conductividad media y una estructura de conductividad fluctuante. La metodología empleada consistió en una combinación de técnicas geoestadísticas: método de Kriging y un modelo fractal, el cual permite la representación de las variaciones de K. El análisis de los resultados obtenidos indican que el procedimiento usado fue adecuado y se ha podido caracterizar con una buena aproximación la conductividad hidráulica.

INTRODUCCIÓN

Las propiedades de un acuífero, conductividad hidráulica, porosidad, varían en el espacio y pueden ser caracterizadas por su distribución espacial. Los estudios hidrogeológicos, en general, y las estimaciones de las propiedades hidráulicas del medio poroso, en particular, requieren gran cantidad de datos provenientes de perforaciones, que habitualmente no existen.

Recientemente, el concepto de geometría fractal ha sido utilizado por muchos investigadores para describir la heterogeneidad presente en el subsuelo (Fang y Wang, 1997; Molz y Boman, 1993).

Los métodos geoestadísticos se basan en reconocer la variabilidad espacial de los parámetros hidrogeológicos. En el enfoque adoptado por estos métodos, el medio subterráneo y sus propiedades son interpretadas como variables aleatorias con una distribución probabilística. Este tipo de enfoque permite estudiar y caracterizar los efectos de la natural heterogeneidad del medio.

Diversas aproximaciones estocásticas de modelado y métodos de estimación estadística pueden utilizarse para caracterizar parámetros hidrogeológicos. Los métodos estocásticos no reducen la incertidumbre con respecto al modelado de un fenómeno, simplemente y en contraste con los métodos deterministas dan la posibilidad de cuantificar dicha incertidumbre (Hatloy A. S., 1994). Los generadores de campos random son extensivamente utilizados como una herramienta para modelar heterogeneidades en medios porosos para sus posteriores aplicaciones en flujo subterráneo y transporte de contaminantes.

En el Noreste de la Provincia de Buenos Aires se reconoce en la parte superior de la secuencia sedimentaria a los denominados Sedimentos Pampeanos. Constituyen un medio acuífero de una productividad media, que está directamente vinculado con los procesos ambientales. Están compuestos por un conjunto de sedimentos loessoides, limoarenosos, areno-limosos, limos y arenas finas, con una porosidad efectiva primaria, incrementada por una secundaria,

producto de una textura migajosa y la presencia de un sinnúmero de canalículos, improntas de raíces de la vegetación herbácea correspondiente a la pradera en la que se originaron.

La conductividad hidráulica, aunque la unidad regionalmente se comporte como homogénea con valores que oscilan entre 5 y 10 m/día (Sala, 1975), localmente presenta heterogeneidades que originan distintas capas productivas con relación a la explotación de las aguas subterráneas. A corta distancia las variaciones de la conductividad hidráulica dan lugar a distintos niveles que por las características enunciadas no resultan fácilmente correlacionables.

En este trabajo se utilizan métodos geoestadísticos para generar aproximaciones estocásticas de la distribución espacial de la conductividad hidráulica en una porción de los sedimentos Pampeanos aplicando conceptos de interpolación -Kriging- a partir de datos de varias perforaciones para obtener el patrón del valor medio de K y de geometría fractal para simular sus variaciones con respecto a dicha media. Esto permitiría mejorar la evaluación relacionada con las posibilidades de extracción de agua del acuífero.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar la experiencia se utilizaron los datos de conductividad hidráulica de acuerdo a los ensayos de bombeo efectuados por Auge y Mugni (1987) en la localidad de Marco Paz (cuenca del Río Matanza), situada a 47 km al sudoeste de Capital Federal en un área de 150 m por 150 m. En esta zona la unidad hidrogeológica está caracterizada por un espesor promedio de 55m y por su composición limoarenosa con variable proporción de material calcáreo. Los valores medios obtenidos de conductividad hidráulica y de transmisividad fueron de 5 m/día y 210 m_d/día respectivamente. Esta unidad se encuentra por encima del acuífero Puelche (arenas francas) que es el más importante y de mayor explotación en la región.

La metodología desarrollada incluyó la combinación de interpolación por medio de Kriging con un modelo fractal para caracterizar la heterogeneidad local de los sedimentos Pampeanos y así explicar las variaciones de la conductividad hidráulica existente en el acuífero.

A partir de la aplicación del método de interpolación mencionado se generó una red (grilla) regular de valores de conductividad hidráulica (K), que define el campo medio de K el cual varía suavemente en el espacio. Luego, se utilizó un método espectral 2D para obtener la componente fluctuante del campo, representando una geología de subsuelo fractal.

Distribución de la conductividad fractal

La motivación de un modelo fractal para caracterizar el subsuelo es que la distribución de las partículas del medio muestra una estructura autosimilar que es típico de objetos fractales (Tyler & Wheatcraft, 1990). Esto significa que un determinado patrón se repite independientemente de la escala utilizada. Por lo tanto, el concepto de geometría fractal se aplica para la descripción de heterogeneidades.

Una hipótesis fundamental de las corrientes estocásticas es que un proceso aleatorio es estacionario o estadísticamente homogéneo (Wheatcraft & Tyler, 1988). Esta hipótesis implica, en este caso, que el campo medio de la conductividad hidráulica no varía

significativamente en el espacio, en cambio el campo aleatorio de K muestra cierta estructura repetitiva (espacialmente periódica).

Una aproximación en la mayoría de los modelos estocásticos es considerar la conductividad hidráulica como un campo random variable en el espacio de acuerdo a una estructura de covarianza dada (Hassan et al, 1997).

Para generar las realizaciones estocásticas de K en una porción de los sedimentos Pampeanos se ha hecho la suposición que los valores de K tienen una distribución log-normal, esto significa que están únicamente determinados por su media y su covarianza. Asimismo, un modelo fBm (movimiento fraccional Browniano) puede ser usado para explicar las variaciones a gran escala de K encontrado en los acuíferos (Mackay, 1991).

Se considera que el campo de K obedece la estadística de fBm, cuando tiene correlaciones en todas las escalas de observación, o sea que la densidad espectral de dicha distribución tiene la forma de una ley de potencia. Dichas consideraciones fueron adoptadas para la caracterización de la distribución de K de la zona de estudio.

En este trabajo, a partir del espectro fBm $f(k)$ dado por (1) se utiliza un método espectral para generar el campo fluctuante de K.

$$f(k) = \frac{s_f^2 (D - 3)}{p \left[k_{max}^{2D-6} - k_{min}^{2D-6} \right] |k|^{8-2D}} \quad (1)$$

donde k = número de onda, D = dimensión fractal, s_f^2 = varianza, k_{max} = número de onda de corte superior del espectro, k_{min} = número de onda de corte inferior del espectro.

APLICACIÓN Y RESULTADOS

La metodología involucra dos pasos en el modelado del campo K. En el primero, las observaciones son "krigeadas" sobre el dominio de estudio, o sea se generan valores de K con la estimación de Kriging en puntos no medidos y con la misma estructura espacial que las observaciones. En la fig. 1 se muestra el campo de conductividad hidráulica simulado de la zona de estudio luego de realizar este primer paso en la metodología.

El análisis de la figura 1 permite identificar un patrón de K que varía suavemente con un rango de variación de 7 m/día.

Como segundo paso, se aplicó una realización estocástica para simular las variaciones impredecibles de K, y se superpuso al campo de K obtenido previamente con el método Kriging. En la figura 2 se puede analizar el resultado obtenido, que muestra una imagen de la heterogeneidad fractal que podría ser generada como resultado de cambios en la litología en un ambiente deposicional siendo de utilidad para evaluar posibles flujos locales o líneas preferenciales de transporte de contaminantes. Si bien de esta forma se representa un efecto localizado, no invalida, dada la variabilidad observada, el empleo de valores medios en problemas destinados a resolver aplicaciones prácticas como pueden ser explotación o depresión de los acuíferos.

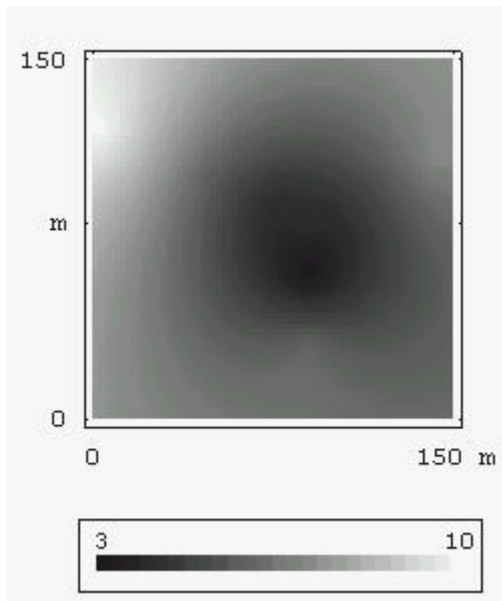


Figura 1. - Campo medio de la conductividad hidráulica (m/día).

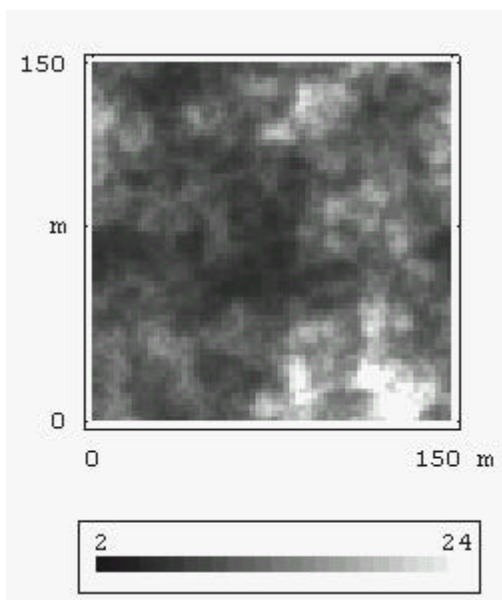


Figura 2.- Campo de la conductividad hidráulica (m/día).

Los resultados obtenidos son representativos de las características litológicas locales observadas en el subsuelo e indican que se pueden observar trayectorias de mayor conductividad en el medio poroso localmente heterogéneo, o sea que en la zona saturada significa la existencia por sectores de líneas de flujo preferencial. Además frentes locales de flujo y de transporte de contaminantes se propagarían a distintas profundidades, realizando en forma figurado un "bypass" en el espacio poral de la matriz.

CONCLUSIONES

En este estudio se presenta una metodología para generar campos de conductividad hidráulica random con una determinada estadística. La técnica de Kriging tiene en cuenta el efecto de escaso muestreo y de espacial variabilidad cuando se estudia el campo K de un acuífero. Su

posterior combinación con técnicas geoestadísticas para generar el campo de K permite tener en cuenta la existencia de heterogeneidades locales. Ello es de importancia para la evaluación y extracción de los niveles productivos del acuífero.

Además, probablemente una mayor significación de este estudio se relaciona con las posibilidades de analizar las variaciones en los procesos de infiltración y en el transporte de contaminantes en el agua subterránea, especialmente si se tiene en cuenta que en distintos sectores de la región este acuífero se constituye en la única recarga (indirecta) del acuífero Puelche, que es la fuente más importante de abastecimiento de agua potable a las zonas densamente urbanizadas de la región.

LISTA DE SÍMBOLOS

k = número de onda

D = dimensión fractal

S_f^2 = varianza

$k_{\max}$ = número de onda de corte superior del espectro

$k_{\min}$ = número de onda de corte inferior del espectro

$f(k)$ = espectro de un proceso fBm

REFERENCIAS

Auge. M. y J. Mugni (1987) "Factibilidad de drenaje en Marcos Paz, Provincia de Buenos Aires, República Argentina". *Décimo Congreso Geológico Argentino, San Miguel de Tucumán*, Actas III, pp. 247 -250.

Fang J. H. y Wang P.P. (1997). "Random Field Generation Using Simulated Annealing vs. Fractal-Based Stochastic Interpolation", *Mathematical Geol.*, Vol.29 (6), pp. 849-858.

Hassan A., Cushman J. y Delleur J. (1997). "Monte Carlo studies of flow and transport in fractal conductivity fields: Comparison with stochastic perturbation theory.", *Water Resources Research*, Vol.33 (11), pp. 2519-2534.

Hatloy A. S. (1994), Numerical Facies Modeling Combining Deterministic and Stochastic Methods. A.A.P.G., *Computer Application in Geology*, Nro.3.

Mackay R. y P.E. O'Connel (1991). "Statistical methods of characterizing hydrogeological parameters", *Applied Groundwater Hydrology*, R. A. Downing &W. B. Wilkinson Eds., Oxford Science Pub., Clarendon Press-Oxford.

Molz F. J. y Boman G. K., (1993). "A Fractal-based stochastic interpolation scheme in subsurface hydrology", *Water Resources Research*, Vol.29 (11), pp. 3769-3774.

Sala J. M. (1975) "Recursos Hídricos (especial mención de las aguas subterráneas)", *Relatorio VI Con. Geol. Arg.*, 169-193.

Tyler S. W. y Wheatcraft S. W., (1990) "Fractal Processes in Soil Water Retention", *Water Resources Research*, Vol.26 (5), pp. 1047-1054.

Wheatcraft S. W. y Tyler S. W. (1988) "An Explanation of Scale-Dependent Dispersivity in Heterogeneous Aquifers Using Concepts of Fractal Geometry", *Water Resources Research*, Vol.24 (4), pp. 566-578.