

# MODELACIÓN DE UN AMBIENTE HIDROGEOLÓGICO Y SU CAPACIDAD PARA CONDUCIR EFLUENTES MINEROS

BERENGUER, Tadeo Alberto; CHILLEMI, María Rosa

Departamento Ingeniería de Minas, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan, Argentina  
[tadeoberenguer@unsj.edu.ar](mailto:tadeoberenguer@unsj.edu.ar) – [chillemi@unsj.edu.ar](mailto:chillemi@unsj.edu.ar)

## RESUMEN

En este trabajo se abordan dos aspectos vinculados al flujo de aguas subterráneas, la modelación del ambiente hidrogeológico y su comportamiento en la conducción de efluentes mineros. El estudio de la distribución espacial y la modelación de la conductividad hidráulica realizado utilizando herramientas probabilísticas y determinísticas. Posteriormente se evalúa el comportamiento del modelo conceptual ante la presencia de un elemento contaminante.

Los datos analizados son extraídos de una zona que reúne características topográficas y geomorfológicas adecuadas para el emplazamiento de un depósito de residuos minerales en alta montaña, específicamente en la Cordillera de los Andes en la provincia de San Juan, Argentina. Los resultados obtenidos son de utilidad en los estudios de prevención de una hipotética contaminación producida por la explotación minera en la región citada.

## INTRODUCCIÓN

Los residuos generados por procesos mineros deben ser cuidadosamente depositados para evitar que sus efluentes se pongan en contacto con los acuíferos subterráneos, éstos pueden modificar su calidad y por consiguiente afectar en forma concatenada a otros elementos del ambiente. El efecto más importante de un contaminante es su movilidad, el tiempo que tarda en llegar a un punto determinado y los niveles de concentración que aporta. Es el comportamiento hidráulico del sustrato el que permite estudiar el proceso de la contaminación.

Mediante la modelación de un ambiente hidrogeológico, se pueden obtener modelos predictivos para la conductividad hidráulica. Los métodos geoestadísticos son instrumentos que permiten caracterizar la variabilidad espacial del parámetro hidrogeológico, realizando un reconocimiento estructural y la cuantificación del error de estimación. Esto justifica la adopción de esta metodología probabilística que permite tomar los principales mecanismos de la variabilidad de los parámetros hidrogeológicos, tratando a las fluctuaciones de esas variables aleatorias como realizaciones particulares de un proceso estocástico.

Un modelo conceptual también se puede obtener por resolución de ecuaciones diferenciales de flujo subterráneo en base al Método de Diferencias Finitas, entregando como resultado la carga hidráulica de la napa freática a través de las curvas equipotenciales y velocidad del flujo en forma vectorial.

Para representar el movimiento del agua subterránea en el acuífero bajo distintas condiciones de borde, de carga y recarga, se utilizó el software MODFLOW de Waterloo Hydrogeologic. (9).

Se simuló el transporte de contaminantes obteniéndose como resultado la variación temporal y espacial de la concentración del constituyente disuelto en el agua subterránea. El modelo conceptual debe ser la mejor representación del comportamiento del ambiente en la zona de estudio en base a los antecedentes recopilados.

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Para modelar la distribución espacial de la conductividad hidráulica a partir de los valores medidos, se aplicó el método geoestadístico, cuya base conceptual es la teoría de Variables Regionalizadas. La variable es una función  $Z(x_i)$  que da el valor de una característica  $Z=(\log_{10}H)$  en un punto del espacio  $x_i$ . La función  $Z(x)$  se caracteriza por su distribución espacial, en la que distinguimos dos componentes de variabilidad, una aleatoria y otra estructurada, ambas definidas por la función semivariograma  $\gamma(h)$ .

El análisis variográfico implica el cálculo e interpretación del semivariograma experimental, el ajuste a un modelo teórico y la validación del modelo. Este análisis es muy importante en un estudio geoestadístico y, por ello, es indispensable tener un buen conocimiento experimental de la variable para su correcta modelización. (4, 6). La secuencia de este proceso conduce a la caracterización local y global de la distribución espacial de la variable experimental. El modelo es esencial para aplicar el método de estimación espacial, Krigeage, con un estimador insesgado y con varianza de error mínima.

## **CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO**

### **GEOLOGÍA**

El área de estudio se encuentra en un ambiente típico de la cordillera de los Andes Centrales de la República Argentina. La zona se presenta dentro de una secuencia volcánica ácida a intermedia de edad Miocena, está caracterizada por una unidad clástica basal de conglomerados y areniscas de grano grueso, con abundante cemento carbonático, contiene andesitas con riolitas subordinadas.

Mapeo del sitio, perforaciones, y algunas líneas geofísicas de sismología, permiten mostrar que la zona de estudio está cubierta por depósitos de morrenas glaciares y de suelos aluviales. También están presentes afloramientos aislados del lecho rocoso y suelos coluviales, particularmente a lo largo de las márgenes sur y oeste de las instalaciones.

Ninguna de las fallas dentro del área parece haber estado activa desde el último período glacial.

Los suelos presentes en el lugar incluyen principalmente morrenas, aluviones y coluviones. Los suelos morrénicos densos y bien seleccionados cubren una parte importante del área de estudio.

Los depósitos no consolidados aluviales en las planicies de inundación, son mezclas de arenas gruesas, medias y gravas, con cantidades menores de arena fina y limos. Estos depósitos tienen un espesor máximo estimado de 10 m aguas arriba, y 5 m de espesor aguas abajo del valle. Son las unidades con mayor permeabilidad.

Los suelos coluviales se presentan principalmente a lo largo del perímetro septentrional y meridional de los límites del valle. Esta unidad está formada por gravas, arenas y cantos rodados, generalmente de espesores comprendidos entre los 2 y 3 m. Los suelos coluviales consisten en gravas arcillosas y se estima que podrán ser utilizados como suelos de alta resistencia y baja permeabilidad para el revestimiento del piso del depósito. (2, 3, 10).

### **GEOMORFOLOGÍA**

La región manifiesta la acción glacial y la erosiva de los ríos de alta montaña. Se caracteriza por la presencia de valles tipo "U" formados por las acciones glaciales de los últimos milenios y rellenados por depósitos del mismo tipo y por sedimentos aportados por la acción erosiva de los ríos de alta montaña. La roca basal que está expuesta en cumbres y algunas laderas es predominantemente volcánica. Las unidades geomorfológicas observadas en la región son:

*Afloramientos Rocosos:* Hay sectores con rocas expuestas y con pendientes abruptas.

*Morrenas:* Esta formación conformada por material transportado por acción del hielo cubre importantes extensiones en la región. Presentan mucha arcilla y limo de modo que son poco permeables.

*Aluvión:* Este material transportado por los cursos de agua y rellena los valles, tiene origen antiguo y reciente. El aluvión reciente se ubica en el curso de drenaje, es de grano grueso y por lo tanto tiene alta permeabilidad. El aluvión antiguo se ubica en las márgenes, formando terrazas con mayor cantidad de material fino, lo que lo hace moderadamente permeable.

*Coluvio:* Formaciones generadas por material transportado gravitacionalmente. Parte de las cuevas y cerros están cubiertos por este tipo de material que manifiesta cierto tipo de cohesión por cierta proporción de arcilla que contienen.

### **HIDROLOGÍA**

La zona de estudio incluye las sub-cuencas de dos arroyos y cubre un área tributaria total de unos 50 km<sup>2</sup>. Los drenajes de los dos cursos convergen hacia un río colector principal de una extensa zona cordillerana. Los dos arroyos influyen mayormente en la modelación del ambiente, ya que aportan a la recarga de agua subterránea. El río colecta ambos cauces y es donde converge el agua subterránea.

## HIDROGEOLOGÍA

El área bajo estudio se encuentra en un ambiente hidrogeológico típico de cordillera, con modestas unidades acuíferas en profundos y angostos valles rocosos, desconectados hidráulicamente de acuíferos relevantes a nivel regional.

Hay una gran interacción entre las aguas que escurren superficialmente y las que fluyen subterráneamente. La recarga de los acuíferos proviene mayoritariamente del derretimiento de nieve.

No se detectan acuíferos en otros medios geológicos que no sean los fluviales-aluviales. No se detectan acuíferos de importancia en los medios fracturados de las rocas intrusivas, sedimentarias y volcánicas. En la zona de estudio se han encontrado tres grandes unidades hidrogeológicas, según el rango de permeabilidad:

*Medio fracturado de permeabilidad muy baja a nula:* constituidos por rocas intrusivas mesozoicas del basamento cristalino con bajo grado de fracturación. Conductividad hidráulica del orden de  $10^{-7}$  cm/s o menos, prácticamente no generan flujos subterráneos.

*Medio fracturado de permeabilidad media a baja:* constituido por rocas estratificadas de origen volcánico. Conductividad hidráulica moderada a baja del orden de  $10^{-4}$  a  $10^{-7}$  cm/s.

*Medio de permeabilidad alta a moderada:* Esta unidad hidrogeológica por sus características y distribución topográfica es la más importante en relación al movimiento de aguas subterráneas; se trata de depósitos sedimentarios no consolidados de edad cuaternaria: depósitos fluviales y aluviales, morrénicos y coluviales. Se distribuyen en los sectores más deprimidos de la zona y cuentan con conductividades hidráulicas del orden de  $10^{-4}$  cm/s y superiores. (2, 3, 10).

## DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS

Los datos provienen de 140 pozos distribuidos en un área de aproximadamente 15 Km<sup>2</sup>. Las mediciones de conductividad hidráulica, oscilan entre valores del orden de  $1 \times 10^{-11}$  cm/s a  $1 \times 10^{-4}$  cm/s. (12). Por razones de cálculo fue necesario transformar a base logarítmica los datos de la variable espacial.

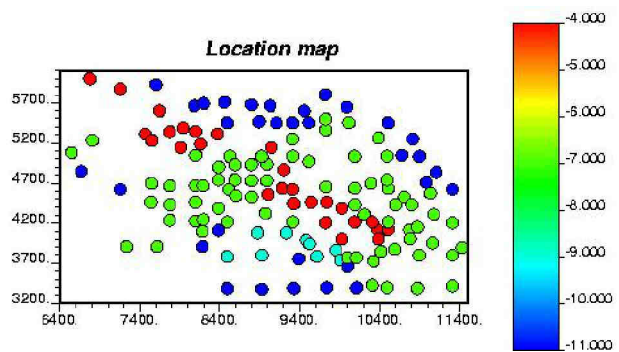


Figura N° 1: Distribución de los 140 puntos de muestreo donde las conductividades hidráulicas oscilan entre  $1 \times 10^{-4}$  cm/s y  $1 \times 10^{-11}$  cm/s

Se realizaron variogramas experimentales en distintas direcciones del plano, obteniéndose los más significativos en la dirección principal del valle y en la transversal, o sea  $160^\circ$  y  $70^\circ$ .

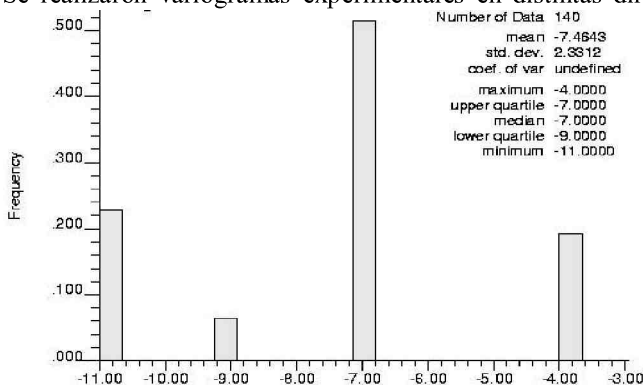


Figura N° 2: Histograma que nos muestra las cuatro clases en que se divide la conductividad hidráulica; ocupando un 50% el valor  $1 \times 10^{-7}$  cm/s; 23% el valor  $1 \times 10^{-11}$  cm/s; el 20% el valor  $1 \times 10^{-4}$  cm/s y el 5% el valor  $1 \times 10^{-9}$  cm/s.

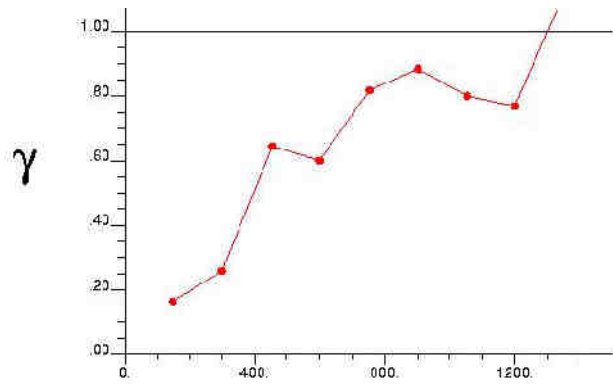


Figura N° 3: Variograma direccional 160°: Alcance = 1.200m; Efecto pepita = 0; Meseta = 0,85

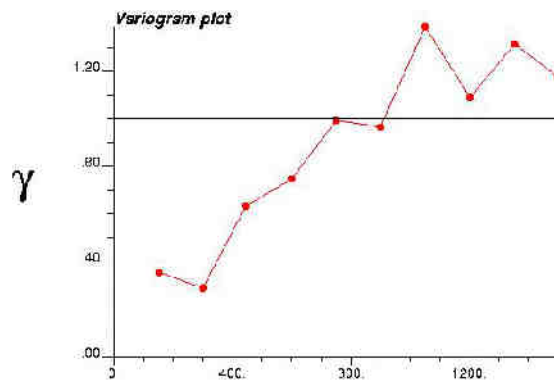


Figura N° 4: Variograma direccional 70°: Alcance = 800m; Efecto pepita = 0; Meseta = 1,00

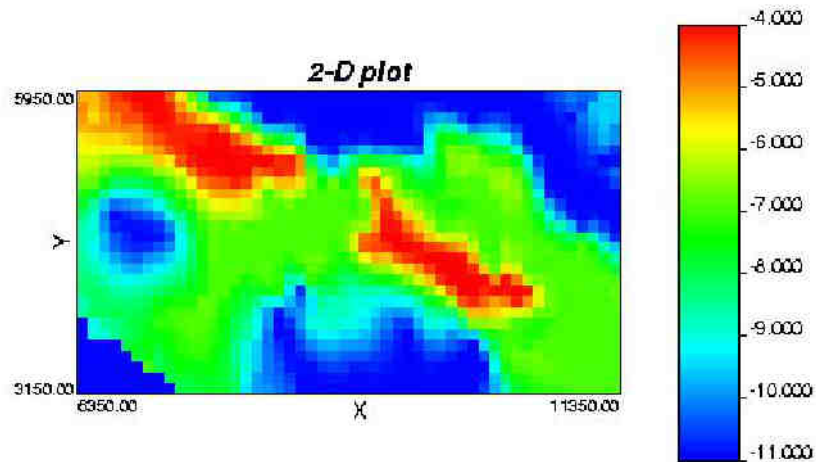


Figura N° 5: Modelo hidrogeológico realizado por Krigeage, muestra las celdas de distintas conductividades hidráulicas con colores que oscilan desde el azul intenso (menor conductividad) hasta el rojo (mayor conductividad), delimitando así las cuatro unidades hidrogeológicas establecidas.

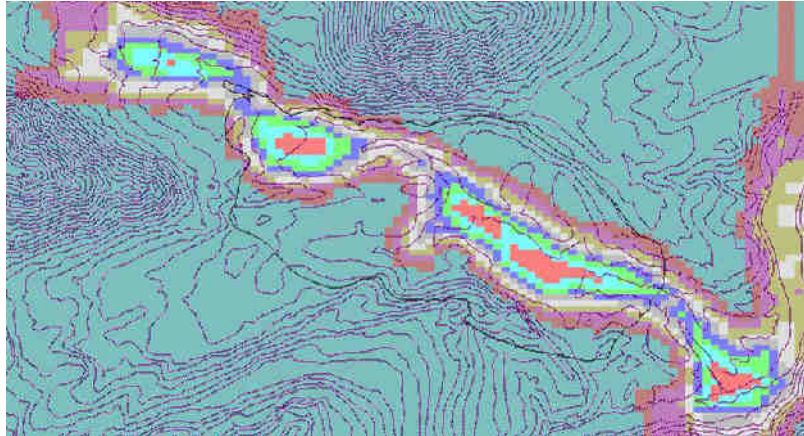


Figura N° 6: Modelo hidrogeológico resultante del proceso de interpolación por Diferencias Finitas donde se observan las celdas con distintas conductividades hidráulicas. Variando desde las rojas centrales con mayor conductividad a las violetas y marrones periféricas con menor conductividad hidráulica.

### MODELACIÓN DEL FLUJO DE CONTAMINANTES

La posibilidad de predecir el comportamiento de los contaminantes, si se manifestaran a pesar de los recaudos aplicados para controlarlos, es una herramienta invaluable para tomar medidas de mitigación y contingencia si fuese necesario. Los parámetros más importantes de un contaminante en cuanto a su movilidad es el tiempo que tarda en llegar a un punto determinado y la concentración del fluido con que lo hace. (5, 7, 8)

Para establecer el flujo a través del medio poroso se asignaron trazadores en lugares donde se simulan la infiltración del contaminante, como resultado se obtuvo la dirección de flujo del agua subterránea. (9)

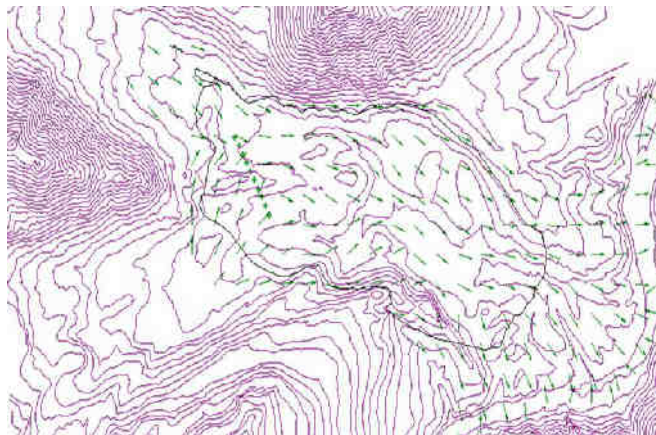


Figura 7: Simulación del flujo de agua subterránea, mediante vectores de velocidades en distintos puntos del medio poroso.

Para simular la evolución de la pluma contaminante, el tiempo final de infiltración y la concentración con que se produce, se eligió como especie contaminante al Zn, un metal pesado común en los sulfuros y de mucha movilidad. La simulación se realizó para diez intervalos, entre los 30 días y los 100 años.

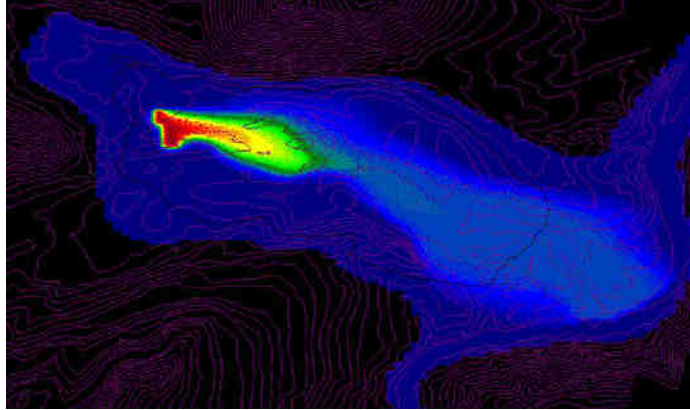


Figura N° 8: Muestra el mapa de la evolución de la pluma contaminante en función del tiempo y la calidad del contaminante en determinado lugar

## CONCLUSIONES

A través de las dos técnicas, la probabilística y la determinística, los dos modelos resultantes fueron bastante similares. El método geoestadístico da al modelo espacial de conductividad hidráulica una mayor confiabilidad porque determina la varianza del error de estimación.

El método de las Diferencias Finitas permitió observar la evolución de la pluma contaminante en función del tiempo y la calidad del contaminante en un determinado lugar. Estos dos parámetros, indispensables a la hora de estudiar un posible impacto ambiental, pueden ser analizados para distintas situaciones.

Para el caso específico de la contaminación con cinc, problema modelado, se observa que los pozos de observación ubicados en diferentes lugares de la zona, detectan concentraciones por debajo del umbral establecido por la Norma OMS 2004 (Organización Mundial de la Salud, año 2004).

## REFERENCIAS

- Bear, J., Verruijt A. 1987. Modeling Groundwater Flow and Polution. D. Reidel Publishing Company.
- Berenguer, Tadeo A, Cascón, R. Chillemi, M. R., Salinas, L. 2003. Emplazamiento, Diseño y Análisis de Diques para Residuos Minerales en el Sector Norte del Valle del Cura, Provincia de San Juan. Proyecto financiado por Universidad Nacional de San Juan.
- Berenguer, Tadeo A., Chillemi, M. R., Cascón, R., Salinas, L 2006. Control de Impactos Ambientales provocados por depósitos de Residuos Minerales en la Cordillera Sanjuanina. Proyecto financiado por Universidad Nacional de San Juan..
- Chica Olmo, M. 2005. Una aproximación geoestadística al análisis espacial de la calidad del agua subterránea. GeoFocus, vol. 5, p.79-93. ISSN: 1578-5157.
- Dames & Moore Group Company. 1999. Caracterización de Mecanismos de Transporte de Contaminantes.
- Galli, A., 2000. Course on Geostatistics applied to mining and petroleum. Ecole des Mines de Paris, France.
- Hutchison, I, Ellison, R. 1992. Mine Waste Management. Lewis Publishers.
- Iribar Sorazu, V. 1998. Contaminación del Acuífero de Troya por Oxidación de Sulfuros: Atenuación Natural e Inducida. Universidad País Vasco. Jornadas sobre contaminación de aguas subterráneas. Valencia.
- Waterloo Hydrogeologic. 2002. Visual Modflow Pro. Groundwater Flow & Contaminant
- www.mineria.sanjuan.gov.ar. Informe Impacto Ambiental Proyecto Pascua-Lama. Cap. 2. p. 78-88.