

January 1999

Modelos hidrogeológicos

José Antonio Galindo Martínez

Universidad de La Salle, Bogotá, revista_uls@lasalle.edu.co

Follow this and additional works at: <https://ciencia.lasalle.edu.co/ruls>

Citación recomendada

Galindo Martínez, J. A. (1999). Modelos hidrogeológicos. *Revista de la Universidad de La Salle*, (28), 63-74.

This Artículo de Revista is brought to you for free and open access by the Revistas de divulgación at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in *Revista de la Universidad de La Salle* by an authorized editor of Ciencia Unisalle. For more information, please contact ciencia@lasalle.edu.co.

Modelos hidrogeológicos

*José Antonio Galindo Martínez
Ingeniero Civil, Especializado en Recursos Hidráulicos
Secretario Académico, Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria
Universidad De La Salle*

Introducción

En los últimos tiempos, dado el vertiginoso avance de la ciencia, especialmente de la ingeniería, se ha hecho necesario simular situaciones reales en pequeña escala ya sea físicamente o por medio de algún algoritmo. Todo esto ha tenido como base la optimización de recursos, la disminución de costos y tiempo, dado el elevado costo y lo prolongado del tiempo de una modelación física.

En el presente escrito, se hará una descripción de los modelos que se em-

plean en la simulación del flujo de agua subterránea.

Generalidades

Los modelos hidrogeológicos son ayudas que se emplean cuando se requiere hacer una representación (imperfecta) de la situación real de un ambiente hidrogeológico.

Cualquier modelo hidrogeológico se caracteriza por ciertos elementos como lo son:

- Hacer supuestos: Cumplimiento ley de Darcy, flujo horizontal, flujo uniforme, densidad constante,
- Limitaciones desde el punto de vista información de alimentación de las bases de datos.
- Condiciones propias de operación del equipo en donde se efectúa la simulación (computadora y paquete de simulación)

Todos estos aspectos hacen que la operación de los modelos hidrogeológicos tenga inconvenientes, pero aún así, son una herramienta muy útil que permiten estudiar el ambiente en diversas situaciones y obtener datos útiles para estudios particulares o trabajos prácticos.

Tipos de Modelos

En todas las ciencias hidráulicas se emplean diferentes tipos de modelos dependiendo del estudio que se quiera realizar y del fenómeno mismo que se estudia. El tipo de modelo que se desarrolle depende en gran medida de

los recursos de que se disponga.

Los principales tipos de modelos usados en hidrogeología son:

- Físicos : Son construcciones físicas. Son poco empleados en hidrogeología por lo complejo que resultaría representar fielmente las condiciones del ambiente natural como lo es el grado de compactación in-situ, la humedad de campo y la presión de tierra.
- Análogos : Son simulaciones de tipo eléctrico, ya que la electricidad tiene gran afinidad en el comportamiento con la hidráulica. En la actualidad no se usan debido a que los hay de mayor exactitud.
- Matemáticos : Son una representación matemática (ecuación o conjunto de ecuaciones) de un ambiente real. Desde el punto de vista de los datos con que se alimente pueden ser:

Determinísticos que dan una respuesta aproximadamente igual debido a que son alimentados con series de datos obtenidos de observaciones reales y Estocásticos que se caracterizan por tener diversidad de respuestas debido a la gran cantidad de variables desconocidas que interviene en el proceso.

Los modelos matemáticos desde el punto de vista procedimiento empleado, también se pueden clasificar como:

- Analíticos, los cuales se basan en desarrollos matemáticos a partir de

ecuaciones conocidas o de dominio conocido, por lo cual se recomiendan en situaciones relativamente sencillas.

- Numéricos, los cuales son más usados en situaciones complejas, trabajan con métodos de prueba y error y aproximaciones sucesivas.

Usos del Modelo

Los usos que tiene un modelo hidrológico son:

- * Concepto Físico: Se emplean cuando se desea aclarar o comprender la física del fenómeno.
- * Predicción: Se emplea para determinar lo que puede ocurrir con alguna situación en particular.
- * Seguimiento: Se emplean cuando se desea efectuar una verificación del procedimiento en desarrollo.

Desarrollo de un modelo Hidrogeológico

La elaboración de un modelo hidrogeológico implica una labor ardua en lo que respecta a recolección de in-

formación, conformación del mismo, pruebas de consistencia; lo cual se traduce en tiempo, recursos y dinero.

Para poder tener un buen resultado en la modelación de un ambiente, es preciso llevar a cabo un plan organizado que permita ir desarrollando paso a paso las etapas, las comprobaciones y modificaciones necesarias. El plan que se debe desarrollar es el siguiente:

1- Definir el objetivo del modelo

Es necesario antes de cualquier actividad, identificar de manera correcta el problema. Este puede ser desde simple flujo hasta transporte de algún tipo de contaminante. Tener claro el objetivo puede ayudar a estudiar con-

clusiones, verificar el funcionamiento del programa, probar la sensibilidad de los parámetros.

2- Formulación del modelo conceptual

Es una representación gráfica de la realidad del ambiente. Este modelo debe poder resolver preguntas de áreas tales como:

- Geología

Los inicios de la modelación se pierden en la niebla de los años, y los primeros recuerdos tal vez se tienen cuando en el antiguo Egipto, se creó el Nilómetro, que dicho en lenguaje técnico actual, es una cámara de quietamiento en la cual se medía el nivel del agua en el río.

- Parámetros del acuífero
- Perturbaciones hidrológicas
- Condiciones de frontera
- Uso del suelo
- Calidad del agua

La formulación del modelo comprende 5 etapas:

A- Construcción del modelo: Debe haber recopilación de información: mapas, estudios, bases de datos; SIG's para conformar bases de datos, coeficientes, perturbaciones y condiciones de frontera.

B- Definición de unidades hidroestratificadas: Esta definición tiene por fin manejar la geología y determinar parámetros. En este proceso se hace necesario localizar registros de pozos, geofísica, mapas de suelo, formulación del modelo estratigráfico y pruebas de bombeo.

C- Balance hídrico del sistema: Se fundamenta en la ecuación de continuidad aplicada a la cuenca hidrogeológica, que dice que las entradas deben ser iguales a las salidas más el cambio en el almacenamiento.

Para determinar las perturbaciones hidrológicas se debe:

- * Definir y localizar las cuencas hidrogeológicas del área de estudio.

- * Localizar y clasificar los pozos en producción.
 - * Recoger información de bombeo de cada pozo.
 - * Recolectar registros de precipitación y escorrentía.
 - * Recopilar mapas de uso del suelo.
 - * Evaluar la evapotranspiración e infiltración.
 - * Investigar el posible goteo de tuberías.
 - * Localizar los cuerpos de agua para determinar la interconexión y si aporta o toma agua del sistema.
 - * Obtener información del comportamiento de la vegetación.
 - * Detectar estructuras hidráulicas.
- D- Definir el flujo del Sistema: Con la base de datos se determina el tipo de flujo, grado de saturación, si el problema es flujo o transporte de solutos, condiciones de frontera, barreras y cuerpos de agua.
- E- Determinación del tipo de modelo: Dependiendo de los objetivos y el alcance, el modelo puede ser:
- * Unidimensional: Básicamente se usa para establecer la concentración de un determinado componente.
 - * Bidimensional: Se emplea especialmente cuando el acuífero

cambia de confinado a libre, espacial o temporalmente.

Tridimensional: Se emplea cuando los acuíferos presentan gradientes altos y se producen cambios en el almacenamiento.

un medio magnético y usar simultáneamente datos gráficos como mapas, fotos y videos, paralelamente con datos alfanuméricos como nombres y herramientas de análisis como la superposición de mapas topográficos, geológicos, hidrológicos y cuantificar las posibilidades de que ocurra un evento.

3- Especificación del modelo matemático

Se basa en la definición del problema matemático. Se precisa determinar tres puntos:

- Ecuaciones fundamentales
- Condiciones de frontera
- Condiciones iniciales

En este proceso se presentan varios pasos que se deben tener en cuenta, los cuales son:

- Seleccionar un equipo adecuado de computación para poder operar adecuadamente el software. Como complemento del software se encuentran los Sistemas de Información Geográfica SIG's, que son una herramienta informática para crear, editar, mostrar, indagar, analizar y administrar mapas digitales y datos relacionados.

El punto fuerte de un SIG es su alta capacidad de almacenar información en

Los SIG's aportan ayuda en el área de los recursos hidráulicos en:

- Hidrología
- Hidrogeología
- Geomorfología
- Prevención de desastres
- Contaminación de cuerpos de agua
- Impacto ambiental

La información que suministra un SIG puede usarse para:

Alimentar modelos matemáticos

- Simulación de niveles piezométricos
- Efectuar estudios de riesgo de contaminación
- Detectar movimiento de fuentes contaminantes
- Identificar zonas de recarga y descarga

En la actualidad, la modelación física, tiene gran importancia, debido a que es una herramienta muy útil en el diseño de todo tipo de obras, por sus óptimos resultados, a un bajo costo; pero con una alta dosis de trabajo, tiempo y paciencia.

- Puede usarse como alternativa una estación de trabajo, que opera bajo un sistema operacional específico (Unix o similar), es más rápido que la computadora tradicional, requiere un administrador de sistemas y tiene alta capacidad de memoria y graficación

4- Configuración del modelo con la realidad

Los modelos matemáticos presentan alto grado de confiabilidad, siempre y cuando tengan suficiente información y de buena calidad.

El modelo debe ser dinámico, es decir, que en la medida en que sea alimentado con información de buena calidad, aporte resultados muy cercanos a la realidad.

La ventaja principal de un modelo es la sensibilidad, que consiste en efectuar en forma ordenada múltiples simulaciones (una simulación es correr el programa con un conjunto de datos de campo) variando de forma progresiva cada uno de los parámetros mientras los demás permanecen constantes. Así determina la sensibilidad del modelo a cada una de los parámetros. La hipersensibilidad del modelo a algún parámetro indica problemas en el modelo conceptual. Estas variaciones permiten detectar las áreas que requieren más estudio.

Como el modelo debe representar la realidad de la mejor manera posible en el pasado, el presente y el futuro,

esto se logra con calibración, verificación y predicción.

1- Calibración

Es la obtención de valores que representen la realidad. Implica conocer los datos históricos iniciales del sistema, y las perturbaciones a las que se ha sometido tales como tasas de bombeo, drenaje artificial, recarga natural o artificial, tasa de evaporación, cambios en condiciones de frontera, cambios espaciales y temporales en las cabezas piezométricas.

La calibración termina cuando después de múltiples ensayos, la diferencia de los resultados del modelo y los datos tomados de la realidad, estén dentro de un rango permisible.

2- Verificación

Usa los datos más recientes, para chequear la confiabilidad de los valores de los parámetros usados en la calibración. Esto puede dar lugar a replantear o realimentar el modelo, si algún dato al inicio era desconocido.

3- Predicción

Es la respuesta del sistema a un conjunto hipotético de condiciones futuras. El tiempo durante el cual se van a obtener respuestas depende de los resultados del análisis de sensibilidad y de los procesos de calibración y verificación.

Planteamiento Matemático de un modelo hidrogeológico

Aunque en el mercado se consiguen programas de diversos usos y aplicaciones, en ocasiones es necesario desarrollar uno de estos para condiciones particulares. Dicha elaboración debe ser un proceso secuenciado y lógico, que cubra todos los aspectos posibles de la simulación que se requiere. El procedimiento es el siguiente:

1. Enunciarlo en forma matemática, cualquiera que sea el método de solución que se adopte. Con el modelo se obtiene un análisis cualitativo (comportamiento) pero es necesario cualificarlo. El modelo puede ser unidimensional, bidimensional o tridimensional.
2. Determinar las variables involucradas. Enunciar la función en la cual los niveles piezométricos dependen de las distancias x , y , z , tiempo, transmisividad y coeficiente de almacenamiento.
3. Establecer la ecuación de continuidad que describa el flujo que tiene

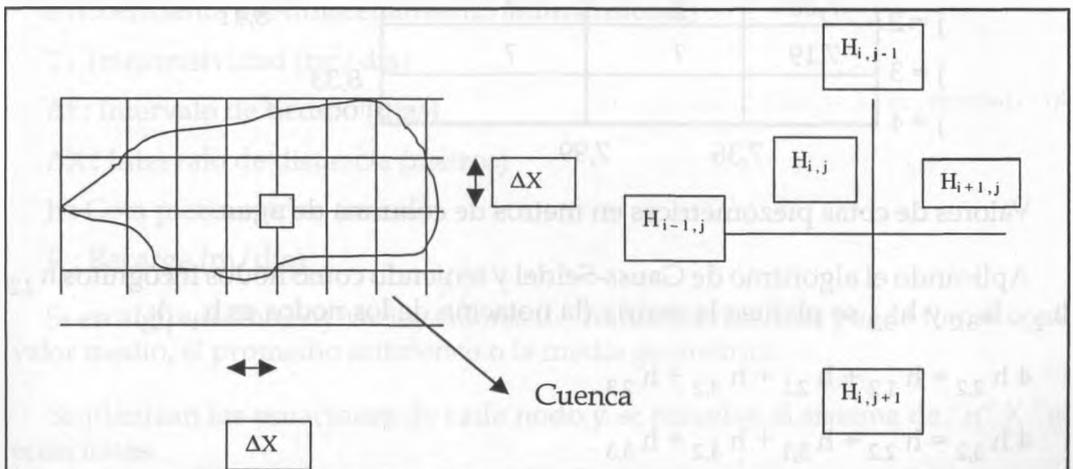
lugar, la cual depende del tipo de acuífero y sus propiedades.

4. Establecer las condiciones iniciales.
5. Establecer las condiciones de frontera. Estas pueden ser políticas, económicas y/o físicas.

La selección del modelo hidrogeológico depende en buena medida del costo y las condiciones de operación. Los modelos matemáticos se pueden aplicar a todo tipo de acuíferos, aplicando las matemáticas a las ecuaciones de flujo, por aproximación diferencial por medio de ecuaciones algebraicas, sustituyendo las ecuaciones diferenciales por elementos discretos.

Discretización

En este procedimiento se "cuadrícula" el área del acuífero y se efectúa el análisis con base en los elementos aledaños, tomando como nodos los cruces de dicha cuadrícula y asignando una notación a cada uno de estos.



Solución

Existen en la matemática, varios métodos de solución de estas ecuaciones, dentro de las cuales se destacan las más importantes:

1- Método iterativo de Gauss-Seidel

Se resuelve la ecuación "m" veces, donde "m" es el número de iteraciones necesarias, hasta entrar en el criterio de convergencia (grado de aproximación en metros de columna de agua). El algoritmo de solución es :

$$h^{m+1}_{i,j} = (1/4) * (h^{m+1}_{i-1,j} + h^{m+1}_{i,j-1} + h^{m+1}_{i+1,j} + h^{m+1}_{i,j+1})$$

$$h^{m+1}_{i,j} - h^m_{i,j} < \text{criterio de convergencia (adoptado)}$$

donde :

$h^{m+1}_{i,j}$: Cota piezométrica al final de la iteración (m.c.a.)

$h^m_{i,j}$: Cota piezométrica antes de iteración (m.c.a.)

Ejemplo de Aplicación

Se pide resolver por iteraciones la siguiente malla, que modela una porción de acuífero.

	i = 1	i = 2	i = 3	i = 4	
		8,18	8,36		
j = 1					
j = 2	7,68	?	?		8,41
j = 3	7,19	?	?		8,33
j = 4					
		7,36	7,99		

Valores de cotas piezométricas en metros de columna de agua.

Aplicando el algoritmo de Gauss-Seidel y teniendo como nodos incógnitos $h_{2,2}$, $h_{2,3}$, $h_{3,2}$ y $h_{3,3}$ se plantea la matriz (la notación de los nodos es $h_{i,j}$):

$$4 h_{2,2} = h_{1,2} + h_{2,1} + h_{3,2} + h_{2,3}$$

$$4 h_{3,2} = h_{2,2} + h_{3,1} + h_{4,2} + h_{3,3}$$

$$4 h_{2,3} = h_{1,3} + h_{2,2} + h_{3,3} + h_{2,4}$$

$$4 h_{3,3} = h_{2,3} + h_{3,2} + h_{4,3} + h_{3,4}$$

ordenando términos y resolviendo la matriz con criterio de convergencia de 0,05 m, se obtiene:

$$h_{2,2} = 7,915 \text{ m.c.a}$$

$$h_{2,3} = 7,623 \text{ m.c.a.}$$

$$h_{3,2} = 8,179 \text{ m.c.a.}$$

$$h_{3,3} = 8,030 \text{ m.c.a.}$$

Se verifica el cumplimiento del criterio de convergencia de cada uno de los nodos calculados, comparando el valor obtenido en la matriz, con el calculado por el algoritmo de Gauss-Seidel; si alguno no cumpliera, se continúa iterando hasta lograr la convergencia.

2-Solución matricial para flujo unidireccional (formulación implícita)

Se toma como algoritmo de solución:

$$(S/\Delta t) h_{i,j}^t = - (T/(\Delta X)^2) h_{i-1,j}^{t+\Delta t} + (2T/(\Delta X)^2 + S/\Delta t) h_{i,j}^{t+\Delta t} + (T/(\Delta X)^2)$$

$$h_{i+1,j}^{t+\Delta t} - R$$

donde :

S: Coeficiente de Almacenamiento (adimensional)

T: Transmisividad (m²/día)

Δt : Intervalo de tiempo (días)

ΔX : Intervalo de distancia (metros)

h: Cota piezométrica (m.c.a.)

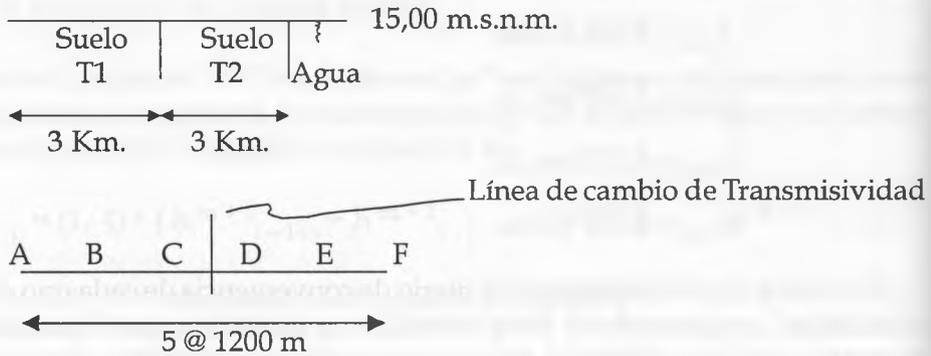
R: Recarga (m/día)

Si en algún tramo hay varios valores de Transmisividad, se puede tomar como valor medio, el promedio aritmético o la media geométrica.

Se plantean las ecuaciones de cada nodo y se resuelve el sistema de "n" X "n" ecuaciones.

Ejemplo de Aplicación

Por medio de Formulación Implícita, calcular el nivel freático cada 1200 m.



- Datos : $T1 = 770 \text{ m}^2/\text{día}$
 $T2 = 1440 \text{ m}^2/\text{día}$
 $S = 0,02$
 $\Delta t = 48 \text{ días}$
 $\Delta X = 1200 \text{ m}$
 $R = 0,8 \text{ mm}/\text{día}$

El cálculo se inicia con todos los valores iguales a la cabeza piezométrica del cuerpo de agua, es decir 15 m.c.a.

Nodo A:

$$0,02 * 15/48 = -770 h_B / (1200)^2 + (2*770 / (1200)^2 + 0,02/48) h_A - 770 h_B / (1200)^2 - 0,8 * 10^{-3}$$

Nodo B:

$$0,02 * 15/48 = -770 h_A / (1200)^2 + (2*770 / (1200)^2 + 0,02/48) h_B - 770 h_C / (1200)^2 - 0,8 * 10^{-3}$$

Nodo C:

$$0,02 * 15/48 = -770 h_B / (1200)^2 + (2*1105 / (1200)^2 + 0,02/48) h_C - 770 h_D / (1200)^2 - 0,8 * 10^{-3}$$

Nodo D:

$$0,02 * 15/48 = -770 h_C / (1200)^2 + (2*1105 / (1200)^2 + 0,02/48) h_D - 770 h_E / (1200)^2 - 0,8 * 10^{-3}$$

Nodo E:

$$0,02 * 15 / 48 = -1440h_D / (1200)^2 + (2 * 1440 / (1200)^2 + 0,02 / 48)h_E - 1440 * 15 / (1200)^2 - 0,8 * 10^{-3}$$

Nodo F:

$$0,02 * 15 / 48 = -1440h_E / (1200)^2 + (2 * 1440 / (1200)^2 + 0,02 / 48) * 15 - 0,8 * 10^{-3}$$

Conformando la matriz y resolviendo:

$$h_A = 18,386 \text{ m}$$

$$h_B = 18,742 \text{ m}$$

$$h_C = 17,575 \text{ m}$$

$$h_D = 17,911 \text{ m}$$

$$h_E = 19,956 \text{ m}$$

Conclusiones

En vista de la vertiginosa carrera de la ciencia, se hace indispensable para el ingeniero de hoy, tener conocimiento y dominio de esta útil herramienta, ya que de llegar a desconocerla, podría quedar obsoleto en un tiempo muy corto debido a que los cálculos "a mano", se quedan únicamente en la academia.

Esto no implica en modo alguno, que haya que desconocer los principios básicos de cada ciencia en particular, sino por el contrario, que conociendo éstos, se pueda entender que es lo que el modelo está realizando, para poder intuir el orden de magnitud de los resultados y no llegar a ser gobernado por la computadora.

Aun con toda la versatilidad que tienen los computadores, estos no eximen al ser humano de pensar; por el contrario, le llevan a efectuar análisis más profundos de los resultados, ya que la computadora por sí sola no es capaz de hacer algo, de lo contrario se caerá en lo que los Norteamericanos llaman: "*Garbage in - Garbage out*". ♦

Bibliografía

- Domenico & Schwartz. "Physical and Chemical Hydrogeology". New York, John Wiley & Sons, 1990.
- Maidment, David. "Introduction to Hydrology". New York, McGraw Hill, 1990.
- Custodio & Llamas. "Hidrología Subterránea". Barcelona, Ediciones Omega, 1996.

