

IMPLEMENTACIÓN DE SIMULADORES EFICIENTES DE FLUJO SUBTERRÁNEO, ORIENTADOS A LA MODELACIÓN DE INTERACCIONES RÍO-ACUÍFERO PARA LA GESTIÓN DEL USO CONJUNTO DE AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS

K. A. Pérez, O. D. Álvarez-Villa y J. F. Salazar

¹Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
E-mail: kalberto.perez@udea.edu.co, odalvare@gmail.com, juan.salazar@udea.edu.co

Introducción

En la utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas se propone la integración de ambas fases del recurso. Para entender su relación mutua se debe caracterizar conjuntamente los cambios de flujo y niveles piezométricos que se pueden producir en los ríos y acuíferos por el aprovechamiento de cualquiera de ellos (Sahuquillo et al, 2010). En la gestión de los recursos hídricos, el uso conjunto se presenta como una alternativa eficiente para hacer frente a la variabilidad climática, de tal forma que para las épocas de altas precipitaciones se haga uso del agua superficial y a la vez se permita la recarga de los acuíferos, y para las épocas de bajas precipitaciones se haga uso del agua almacenada en los acuíferos (Barlow et al, 2002; Vélez, 2010).

Para cuantificar las variables de estado involucradas en el uso conjunto suelen utilizarse modelos matemáticos cuya solución numérica suele tener altos costos en el uso de los recursos informáticos en las simulaciones. Una alternativa efectiva es aplicar técnicas matemáticas para la reducción del tamaño de los modelos numéricos de flujo subterráneo que incluyan la parametrización de la relación río-acuífero. Algunos métodos desarrollados e implementados en la literatura para la reducción de modelos de flujo subterráneo son: métodos de autovalores y transformación de Lanczos; con su aplicación se ha demostrado que los tiempos de ejecución de los modelos reducidos son menores, sin sacrificar la representación adecuada de los diferentes parámetros del acuífero.

En este trabajo se han implementado técnicas de reducción de modelos de flujo subterráneo que puedan utilizarse eficientemente en la modelación de las interacciones río-acuífero para la gestión del uso conjunto. Se han considerado dos cuestiones importantes: i) que las técnicas puedan ser utilizadas en acuíferos libres, ii) que se considere el efecto de la variabilidad espacial y temporal de los parámetros de conexión río-acuífero sobre los procedimientos de reducción.

Marco conceptual

Aplicando la ecuación de continuidad sobre un volumen de control en forma de ortoedro y asumiendo que los ejes de anisotropía son paralelos a los ejes coordenados, se llega a la ecuación en derivadas parciales de flujo subterráneo:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + Q(x, y, z, t) = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad [1]$$

donde $h=h(x,y,z,t)$ es la altura piezométrica en un punto (x,y,z) y en el tiempo t . Las conductividades hidráulicas en la dirección de los ejes coordenados son k_x , k_y y k_z . El coeficiente de almacenamiento específico es S y $Q(x,y,z,t)$ son las acciones exteriores que actúan sobre el acuífero. Aplicando un esquema de solución numérica por diferencias finitas o elementos finitos se obtiene la siguiente ecuación matricial:

$$Ah + q = S \frac{\delta h}{\delta t} \quad [2]$$

Donde $A \in R^{n \times n}$ $[L^2/T]$ es una matriz de transmisividades simétrica, dispersa y definida positiva; $S \in R^{n \times n}$ $[L^2]$ es la matriz diagonal de almacenamientos; $h=h(x,y,z,t) \in R^n$ $[L]$ es el vector que contiene las alturas piezométricas y $q \in R^n$ $[L^3/T]$ es el vector que contiene las acciones exteriores.

El método de los autovalores (MAV), fue propuesto por Sahuquillo (1983). Consiste básicamente en una descomposición modal de la ecuación [1], donde los modos dominantes se utilizan para obtener ecuaciones de estado que permiten cuantificar la evolución temporal del sistema. El marco conceptual del MAV permite desarrollar tanto soluciones analíticas de la ecuación [1] como numéricas de la ecuación [2], para diferentes tipos de geometrías, distribuciones espaciales de los parámetros hidrodinámicos y tipos de acciones exteriores, para diversas variables de estado del acuífero. Particularmente para la relación río-acuífero, los Modelos Pluricelulares

Englobados (una adaptación que desagrega espacialmente el modelo unicelular) permiten realizar los cálculos de forma eficiente, directa y explícita mediante expresiones simples y operativas (Pulido-Velázquez et al., 2005).

El método de reducción de Lanczos (MRLAN) ha sido empleado para la reducción de modelos en muchas áreas de la ingeniería. El MRLAN es un método iterativo para la generación de subespacios de Krylov asociados al sistema a reducir. Los subespacios de Krylov se basan en la generación iterativa de un subespacio ortogonal que permite reducir el sistema original. Dunbar y Woodbury (1989) reconocen la utilidad de los métodos de Krylov en el campo de la hidrogeología, y usan MRLAN para reducir modelos de flujo subterráneo en acuíferos sintéticos homogéneos y heterogéneos, discretizados en elementos finitos. Ellos utilizan una transformación inversa de la matriz de transmisividades para la generación del subespacio ortogonal de proyección del modelo, con lo cual se ajustan mejor autovalores del modelo que se encuentran más cercanos al eje imaginario, es decir, los menores. Además, reconocen la necesidad de usar el principio de superposición para lograr la reducción eficiente de los modelos en régimen transitorio.

Estado del arte

Soluciones mediante el MAV han sido implementadas en SIMGES de AQUATOOL (Andreu et al, 1996), un sistema soporte de la decisión para sistemas de recursos hídricos desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia. SIMGES se destaca su capacidad de modelar el uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas mediante diversos tipos de modelos matemáticos. Los acuíferos y las relaciones río-acuífero se simulan con modelos unicelulares, pluricelulares o utilizando el MAV mediante modelos distribuidos en los que se considera la variación espacial de las propiedades hidrodinámicas de los acuíferos. Respecto a la eficiencia de las simulaciones realizadas con el MAV en SIMGES, Sahuquillo et al (2010) afirma explícitamente que es el método más eficiente para simular sistemas cuyo comportamiento pueda considerarse lineal con suficiente aproximación.

Álvarez-Villa (2014) estudió con profundidad, implementó y propuso técnicas de reducción orientadas a la modelación del uso conjunto con énfasis en el MAV y el MRLAN. Sobre el MAV, probó que es una técnica adecuada para simular flujo subterráneo en acuíferos pertenecientes a modelos de uso conjunto. Adicionalmente propuso un nuevo marco conceptual denominado MAV-CSEM, que es mucho más eficiente para la disminución del tamaño del modelo con respecto al MAV convencional. Con respecto al MRLAN, obtuvo un resultado semejante al presentado para el MAV en relación a la reducción del costo computacional. Concluye que la selección de uno u otro método de reducción depende del tipo de problema que se esté enfrentando, ya que el MAV-CSEM es más eficiente en la ejecución del modelo de flujo, pero el MRLAN es más eficiente para simular variables puntuales.

Metodología

La implementación de simuladores eficientes de flujo subterráneo se ha dado en dos direcciones: i) el desarrollo conceptual de técnicas matemáticas de reducción de modelos de flujo subterráneo, ii) la implementación de librerías en el lenguaje de programación Fortran 90 que permitan manipular eficientemente las estructuras de datos asociadas a la solución de la ecuación [2].

En el primer caso se ha utilizado como base el desarrollo conceptual de las técnicas del MVA y del MRLAN realizado por Álvarez-Villa (2014). Para el segundo caso se han utilizado dos librerías: i) PETSc desarrollado por el Argonne National Laboratory de los Estados Unidos. Compuesto por subrutinas y estructuras de datos que pueden ser usadas en la solución numérica de la ecuación de flujo. Es particularmente útil para resolver los sistemas de ecuaciones resultantes con el método del Gradiente Conjugado, y para paralelizar las matrices de las simulaciones realizadas. ii) SLEPc es una extensión de PETSc que proporciona un conjunto de librerías que solucionan eficientemente el problema de autovalores para grandes sistemas matriciales.

Resultados

Se ha realizado un desarrollo conceptual para la reducción de modelos de flujo subterráneo en acuíferos libres, utilizando la ecuación en tres dimensiones de flujo subterráneo, y se logró considerar el efecto de la variabilidad espacial y temporal de los parámetros de conexión río-acuífero sobre los procedimientos de reducción.

Se ha implementado un paquete de códigos que simulan eficientemente el flujo subterráneo. Se ha probado que los tiempos de ejecución de la implementación son mucho menores que los requeridos por implementaciones clásicas que no aplican simuladores eficientes, esto sin sacrificar la representatividad física de los modelos clásicos.

Referencias

- Álvarez-Villa, O.D. (2014). Simulación eficiente de las relaciones río-acuífero en sistemas de utilización conjunta de técnicas de reducción de modelos lineales invariantes en el tiempo. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Andreu J., J. Capilla, E. Sanchis (1996) AQUATOOL, a generalized decision support system for water resources planning and management. *Journal of Hydrology*, 177, 269-291.
- Barlow P., Ahlfeld D., Dickerman D. (2002) Conjunctive-Management Models for Sustained Yield of Stream-Aquifer Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol 129.
- Dunbar W.S., A.D. Woodbury (1989) Application of the Laczos

algorithm to the solution of the groundwater flow equation. *Water Resources Research*, 25(3), 551-558.

Pulido-Velázquez, D. (2005) Solución de no Linealidades en la Aplicación del Método de Autovalores para la Simulación de Sistemas de Uso Conjunto. Extensión a Acuíferos no Confinados. *Disertación Doctoral*, Universitat Politècnica de Valencia.

Sahuquillo A. (1983). An eigenvalue numerical technique for solving unsteady groundwater continuously in time. *Water resources research*.

Sahuquillo A., E. Cassiraga, A. Solera, J.M. Murillo (2010) Modelos de Uso Conjunto de Aguas Superficiales y Subterráneas. *Publicación Del Instituto Geológico y Minero de España (IGME)*. Madrid, España.

Vélez, M. (2004). *Hidráulica de aguas subterráneas*. Medellín. Universidad Nacional de Colombia.