

Resumen

En este trabajo se ha estudiado la posibilidad de usar algunas técnicas de reducción para lograr una simulación más eficiente del flujo subterráneo en los acuíferos contenidos en modelos de uso conjunto. Así, el principal enfoque de esta investigación ha sido relacionar la parametrización de las relaciones río-acuífero con las características del modelo reducido para encontrar los efectos de dicha parametrización sobre la eficiencia de la reducción.

La primera metodología propuesta, denominada Método de los AutoValores con Compresión Selectiva y Enmascaramiento Modal (MAV-CSEM), puede reducir dramáticamente el tamaño de un modelo de flujo subterráneo, aumentando la eficiencia de su ejecución y disminuyendo la memoria virtual requerida. A efectos prácticos, el MAV-CSEM utiliza los siguientes conceptos novedosos: (i) modos efectivos, (ii) modos residuales, (iii) límite de participación modal, (iv) máscara de estados efectivos y (v) nivel de continuidad. Este marco conceptual no solamente ayuda a identificar los modos que más contribuyen a la respuesta del acuífero por causa de las excitaciones externas, sino que también ayuda a lograr una simulación más rápida del flujo en el acuífero que la obtenida por el MAV clásico. La principal ventaja del MAV-CSEM es que, aumentando el número de celdas del modelo, se puede considerar más detalladamente la variabilidad espacial de los parámetros hidráulicos del acuífero en la modelación del flujo subterráneo, sin que la eficiencia computacional de las simulaciones se vea considerablemente afectada, especialmente cuando dicho acuífero forma parte del modelo de un sistema de uso conjunto. El MAV-CSEM ha sido probado en acuíferos rectangulares homogéneos simples. Los resultados obtenidos tienen un comportamiento similar a los simulados usando el MAV clásico o las Diferencias Finitas (DF), pero la simulación es mucho más eficiente. Se ha efectuado un análisis de sensibilidad del impacto de cambiar la parametrización de las condiciones de contorno tipo río, en función de la conductancia del lecho, sobre algunos parámetros de control del acuífero como las alturas piezométricas, los volúmenes almacenados y los caudales de intercambio río-acuífero. De los resultados de dicho análisis se concluye que, al disminuir la conductancia del río, se mejora el comportamiento del MAV-CSEM por que se necesitan menos modos para obtener resultados confiables en las variables antes mencionadas.

El MAV-CSEM permite desarrollar criterios de base física para generar modos efectivos más eficientemente, para remover los modos residuales y para construir las máscaras de estados efectivos que aceleran la ejecución de las simulaciones. En base a estas ideas, se han propuesto algoritmos para generar los modos efectivos y configurar las máscaras de estados efectivos. Estos algoritmos se basan en métodos iterativos para resolver Problemas Generalizados de AutoValores Simétricos y Dispersos (PGAVSD), combinándolos con índices de base física que permiten evaluar la efectividad de un modo generado y detener la secuencia de generación modal. La detección de los modos efectivos se ha basado en la evaluación de sus coeficientes de reparto, comparándolos con el límite de participación modal impuesto. La parada de la generación de los modos efectivos ha sido evaluada calculando los coeficientes de reparto acumulados modales y comparándolos con el nivel de conservación impuesto sobre el modelo reducido. Las ventajas de incluir dichos criterios en

la resolución de un PGAVSD son: *(i)* se evita la ejecución de operaciones innecesarias, *(ii)* se preserva la ecuación de continuidad para el volumen que entra al acuífero proveniente de las acciones exteriores de forma relativamente adecuada y *(iii)* al usar algoritmos iterativos basados en el producto matriz-vector disperso para resolver PGAVSD, se mantiene la estructura dispersa de las matrices que componen el modelo de flujo, la cual se puede usar para ahorrar operaciones computacionales y disminuir el almacenamiento requerido en las simulaciones.

En este trabajo se han implementado dos generadores dispersos de modos efectivos. El primero de ellos está basado en una modificación de la iteración de gradiente conjugado con deflación que usa preconditionamiento ILU para acelerar las iteraciones vectoriales y minimizar el cociente de Rayleigh. La antes mencionada generación vectorial ha probado ser muy eficiente cuando es necesario calcular una pequeña cantidad de los modos asociados a los autovalores de menor magnitud. El algoritmo genera cada modo, calcula sus coeficientes de reparto para verificar si dicho modo es efectivo, evalúa los coeficientes de reparto acumulados y verifica el criterio de parada para finalizar la generación. El segundo generador de modos efectivos está basado en la iteración racional de Lanczos con reinicio explícito y reortogonalización parcial para calcular secuencialmente subconjuntos de modos. El reinicio explícito aplica una deflación sobre un nuevo vector inicial de Lanczos para prevenir la convergencia a uno de los autovectores previamente disponibles. Una vez que cada reinicio ha construido otro conjunto de modos, el generador calcula los coeficientes de reparto de cada nuevo modo para detectar cuales de éstos son efectivos. El proceso se repite para todos los nuevos modos. Posteriormente, se calculan los coeficientes de reparto acumulados y el generador revisa si se ha alcanzado el criterio de parada de la generación para todas las acciones exteriores. Si dicho criterio no ha sido alcanzado, se efectúa un nuevo reinicio imponiendo un desplazamiento espectral conveniente para mejorar la convergencia modal. Los resultados de muchos experimentos numéricos efectuados han demostrado que el generador racional de Lanczos es muy eficiente, incluso para modelos de flujo subterráneo de gran tamaño donde el dominio espacial del acuífero ha sido discretizado usando decenas de miles de nodos pertenecientes a una malla de DF. Los generadores propuestos han sido usados para reducir los modelos de flujo subterráneo para: *(i)* acuíferos rectangulares homogéneos e isótropos conectados con un río recto, *(ii)* acuíferos rectangulares heterogéneo conectados con un río recto y *(iii)* un acuífero altamente heterogéneo con contornos irregulares, conectado con un río sinuoso e inclinado. Los resultados de las simulaciones muestran que la generación iterativa es más eficiente que calcular el espectro completo del PGAVSD y permite reducir modelos heterogéneos de gran tamaño, aún cuando muchas acciones exteriores están aplicadas sobre el acuífero.

También se ha propuesto una extensión del Método racional de LANczos (MLAN) para reducir eficientemente las relaciones río-acuífero en modelos de sistemas de uso conjunto. El MLAN clásico se usa para generar una base ortogonal de un subespacio de Krylov de reducción. Además, los factores de participación acumulados de los vectores de Lanczos se usan como criterio de parada de la generación antes mencionada, evaluando si la ecuación de conservación de masa para el volumen de agua entrando de las acciones exteriores se satisface apropiadamente. El esquema de reducción se aplica sobre el modelo de flujo subterráneo con el propósito de ensamblar una secuencia de sistemas de ecuaciones lineales reducidas, cuyas soluciones representan los estados del acuífero a lo largo del horizonte de simulación. Para hacer posible el cálculo de los volúmenes agregados de intercambio entre el río y el acuífero, se ha propuesto un esquema de integración numérica temporal de los estados de Lanczos; también se incluye el concepto de parámetros de control en el MLAN con el fin de acelerar los cálculos de las relaciones río-acuífero y otras variables

de estado requeridas. Por último, el MLAN ha sido probado para reducir los modelos de flujo en acuífero rectangulares homogéneos. Los resultados han sido comparados con los obtenidos mediante: (i) modelos pluricelulares englobados, (ii) modelos resueltos usando el MAV clásico y (iii) modelos resueltos por DF espacio-temporales. Se ha encontrado que el MLAN se comporta mejor que las DF, alcanzando un desempeño comparable al exhibido por el MAV clásico con truncamiento conservativo, pero es menos eficiente que los modelos pluricelulares englobados. Un análisis del impacto de modificar la parametrización de las relaciones río-acuífero, en función de la conductancia de río, sobre algunos parámetros de control como alturas piezométricas, volúmenes almacenados y flujos internos, ha demostrado que, al disminuir dicha conductancia, el desempeño del MLAN mejora por que se necesitan menos vectores de Lanczos para obtener resultados adecuados.

El MAV-CSEM, junto con el MLAN, han probado ser poderosas herramientas para reducir modelos de flujo subterráneo de gran tamaño. Aquí, el MAV-CSEM y el MLAN han sido aplicados para reducir dos acuíferos lineales altamente discretizados, complejos y heterogéneos. El primero es un acuífero rectangular, conectado con un río recto, compuesto por tres bandas con propiedades hidráulicas uniformes. El segundo es un acuífero altamente heterogéneo y anisótropo, de contornos irregulares, conectado con un río sinuoso e inclinado. En ambos acuíferos, la aplicación de cada técnica de reducción ha consistido en un análisis de sensibilidad de la influencia de modificar la parametrización de las relaciones río-acuífero, en función de la conductancia del río y de los parámetros de reducción (límite de participación modal para MAV-CSEM y tamaño del subespacio de Krylov de reducción para el MLAN), en la representación más adecuada de algunos parámetros de control seleccionados, como lo son las alturas piezométricas, los volúmenes almacenados y los flujos internos. Los resultados han mostrado el poder de ambas técnicas para reducir eficientemente los modelos de flujo subterráneo planteados. Sin embargo, las principales diferencias encontradas entre ambos son: (i) el MAV-CSEM es más demandante computacionalmente para calcular el subespacio de reducción de autovectores, pero su ejecución del modelo de flujo es más rápida, (ii) el MLAN calcula más adecuadamente las variables distribuidas en el acuífero como alturas piezométricas, volúmenes almacenados y flujos internos si la parametrización de la iteración de Lanczos se realiza apropiadamente y (iii) el MAV-CSEM obtiene más eficiente y adecuadamente las relaciones río-acuífero agregadas a lo largo de toda la red de drenaje. La principal conclusión de estas aplicaciones es que la selección de uno u otro método de reducción depende del tipo de problema que se está enfrentando y de los parámetros de control requeridos por éste.