

# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>v</b>
<b>Resumen</b>	<b>VII</b>
<b>Abstract</b>	<b>XI</b>
<b>Resum</b>	<b>XV</b>
<b>Notación matemática</b>	<b>XIX</b>
<b>Glosario de abreviaturas</b>	<b>XXI</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Las relaciones río-acuífero . . . . .	2
1.2. La utilización conjunta . . . . .	4
1.3. La modelación de la interacción río-acuífero para fines de aprovechamiento . . . . .	6
1.4. Propósitos y alcances . . . . .	7
1.5. Organización del documento . . . . .	8
<b>2. Sistemas hidrogeológicos lineales invariantes en el tiempo</b>	<b>11</b>
2.1. Introducción . . . . .	11
2.2. Sistemas lineales, superposición y reducción . . . . .	12
2.2.1. Descripción matemática de un sistema . . . . .	13
2.2.2. Clasificación de los sistemas . . . . .	13
2.2.3. El principio de superposición . . . . .	14
2.2.4. Esquema general para la reducción de modelos . . . . .	14
2.3. Modelos lineales clásicos para cuantificar la relación río-acuífero en la utilización conjunta . . . . .	16
2.3.1. Modelos agregados . . . . .	16
2.3.2. Modelos distribuidos analíticos . . . . .	16
2.3.3. Funciones de influencia . . . . .	17
2.4. Esquemas de reducción de SLIT para la modelación hidrogeológica y la cuantificación de la relación río-acuífero en la utilización conjunta . . . . .	18
2.4.1. Reducción modal . . . . .	18
2.4.2. Reducción semiempírica . . . . .	20
2.4.3. Reducción basada en los datos . . . . .	21
2.4.4. Reducción en los subespacios de Krylov . . . . .	21
2.5. EDP lineal de flujo de agua subterránea . . . . .	23
2.6. Condiciones inicial y de contorno . . . . .	23
2.6.1. Condición inicial . . . . .	23

2.6.2.	Condiciones de contorno . . . . .	24
2.6.3.	Formulación matemática para la interacción río-acuífero en un sistema hidrogeológico lineal . . . . .	24
2.7.	Descomposición del problema de flujo subterráneo mediante el principio de superposición . . . . .	26
2.8.	Ecuación matricial-diferencial para la simulación del flujo subterráneo en acuíferos lineales . . . . .	28
2.8.1.	Solución numérica de la ecuación de flujo subterráneo mediante el uso de las diferencias finitas . . . . .	29
2.8.2.	El problema en régimen permanente . . . . .	32
2.8.3.	El problema en régimen transitorio . . . . .	32
2.9.	Cálculo de las variables de respuesta del acuífero en modelos de simulación numérica por reducción . . . . .	33
2.9.1.	Cálculo de alturas piezométricas . . . . .	35
2.9.2.	Cálculo del volumen de agua almacenado . . . . .	36
2.9.3.	Cálculo del caudal de intercambio entre el acuífero y el contorno dependiente de una altura externa . . . . .	36
2.10.	Tratamiento de condiciones de contorno no invariantes en modelos lineales de flujo subterráneo . . . . .	37
2.11.	Conclusiones . . . . .	39
<b>3.</b>	<b>Reducción modal analítica de sistemas hidrogeológicos</b>	<b>41</b>
3.1.	Introducción . . . . .	41
3.2.	Solución del problema en régimen permanente . . . . .	42
3.3.	Solución del problema en régimen transitorio . . . . .	42
3.3.1.	Solución general: acciones exteriores nulas . . . . .	42
3.3.2.	Solución particular: acciones exteriores dadas . . . . .	44
3.3.3.	Solución total transitoria: principio de superposición . . . . .	45
3.4.	Cálculo del caudal de intercambio entre el río y el acuífero: el modelo pluricelular englobado . . . . .	46
3.5.	Algunas soluciones analíticas de interés en la modelación de sistemas de recursos hídricos . . . . .	49
3.5.1.	Acuífero perfectamente conectado y acción distribuida . . . . .	49
3.5.2.	Acuífero perfectamente conectado y acción puntual . . . . .	53
3.5.3.	Acuífero parcialmente conectado y acción distribuida . . . . .	53
3.5.4.	Acuífero parcialmente conectado y acción puntual . . . . .	55
3.6.	Caso de referencia . . . . .	56
3.6.1.	Autovalores, autofunciones y factores de reparto . . . . .	56
3.6.2.	Simulaciones para acción distribuida . . . . .	59
3.6.3.	Simulaciones para acción puntual . . . . .	65
3.7.	Conclusiones y discusión . . . . .	66
<b>4.</b>	<b>Reducción modal numérica con el método de los autovalores</b>	<b>73</b>
4.1.	Introducción . . . . .	73
4.2.	Solución numérica del flujo subterráneo por el método de los autovalores . . . . .	74
4.2.1.	El problema en régimen permanente . . . . .	74
4.2.2.	El problema en régimen transitorio . . . . .	75
4.2.3.	Volumen de intercambio acuífero-masa superficial de agua . . . . .	78
4.3.	Truncamiento modal de un modelo de flujo subterráneo mediante el método de los autovalores . . . . .	79

4.4.	Caso de referencia . . . . .	81
4.4.1.	Estudio comparativo del problema de autovalores para las soluciones analíticas y numéricas . . . . .	82
4.4.2.	Simulaciones para acción distribuida . . . . .	87
4.4.3.	Simulaciones para acción puntual . . . . .	97
4.5.	Conclusiones y discusión . . . . .	100
<b>5.</b>	<b>Estimación de parámetros hidrogeológicos usando hidrogramas de flujo base y modelos lineales reducidos</b>	<b>103</b>
5.1.	Introducción . . . . .	103
5.2.	Modelación de la interacción río-acuífero para el análisis de curvas de agotamiento en ríos ganadores . . . . .	104
5.2.1.	Soluciones analíticas para el drenaje de un acuífero a un río como respuesta a la recarga natural . . . . .	104
5.2.2.	Reducción empírica de soluciones analíticas para acuíferos lineales en el análisis de curvas de agotamiento . . . . .	107
5.3.	Características del acuífero sintético irregular . . . . .	109
5.4.	Método de Halford y Mayer para la estimación de la longitud del modelo unidimensional equivalente . . . . .	111
5.5.	Análisis por el MAV . . . . .	112
5.5.1.	Resultados para los problema de autovalores . . . . .	112
5.5.2.	Componente permanente de la solución por el MAV . . . . .	114
5.5.3.	Simulaciones en régimen transitorio por el MAV . . . . .	115
5.5.4.	Influencia de la componente permanente en la relación río-acuífero transitoria simulada por el MAV . . . . .	117
5.6.	Efectos producidos por la variación de las conductancias del lecho del río sobre el índice de agotamiento estimado del hidrograma . . . . .	120
5.7.	Resultados de las simulaciones mediante la solución de Rorabaugh y comparación cuantitativa con las simulaciones por el MAV . . . . .	122
5.8.	Validación de los modelos resueltos por el MAV con respecto a soluciones de referencia por DF . . . . .	124
5.9.	Consideraciones para la reducción del modelo . . . . .	126
5.10.	Conclusiones y discusión . . . . .	133
<b>6.</b>	<b>Compresión selectiva, enmascaramiento y generación modal en la reducción por el método de los autovalores</b>	<b>135</b>
6.1.	Introducción . . . . .	135
6.2.	Compresión selectiva y enmascaramiento de los modos efectivos en un modelo de flujo subterráneo resuelto mediante el MAV . . . . .	136
6.3.	Métodos para resolver el problema de autovalores . . . . .	140
6.3.1.	Métodos de iteraciones en el polinomio característico . . . . .	140
6.3.2.	Métodos basados en transformaciones . . . . .	141
6.3.3.	Métodos de iteración en vectores . . . . .	142
6.3.4.	Métodos de minimización del cociente de Rayleigh . . . . .	144
6.3.5.	Métodos de proyección . . . . .	145
6.4.	EVMPACK, la librería para la simulación del flujo subterráneo mediante el MAV-CSEM . . . . .	148
6.5.	Generación eficiente de modos efectivos para simular el flujo subterráneo usando el MAV-CSEM . . . . .	148

6.5.1.	Resolución de los sistemas de ecuaciones lineales en la generación de los autovectores para el MAV . . . . .	149
6.5.2.	Deflación y reortogonalización . . . . .	155
6.5.3.	Generador por minimización del cociente de Rayleigh mediante gradiente conjugado acelerado con deflación . . . . .	156
6.5.4.	Generador racional de Lanczos con reinicio explícito . . . . .	160
6.5.5.	Generadores de modos efectivos para modelos reducidos de flujo subterráneo mediante el MAV-CSEM . . . . .	169
6.6.	Aplicación del MAV-CSEM al caso de referencia . . . . .	174
6.6.1.	Generación de los modos efectivos . . . . .	174
6.6.2.	Análisis de los resultados de las simulaciones para acciones exteriores uniformemente distribuida y puntual . . . . .	177
6.7.	Simulación reducida del flujo en un acuífero heterogéneo rectangular mediante el MAV-CSEM . . . . .	181
6.7.1.	Generación selectiva de los modos efectivos . . . . .	181
6.7.2.	Análisis de los resultados de las simulaciones . . . . .	187
6.8.	Conclusiones y discusión . . . . .	191
<b>7.</b>	<b>Reducción de modelos de flujo subterráneo mediante la transformación de Lanczos</b> . . . . .	<b>193</b>
7.1.	Introducción . . . . .	193
7.2.	Procedimiento de reducción de un modelo de flujo subterráneo mediante el MLAN . . . . .	194
7.2.1.	El problema en regimen permanente . . . . .	194
7.2.2.	El problema en regimen transitorio . . . . .	194
7.2.3.	Volumen de intercambio acuífero-masa superficial de agua . . . . .	199
7.3.	Aplicación del MLAN al caso de referencia . . . . .	199
7.3.1.	Características de los subespacios de Krylov generados . . . . .	200
7.3.2.	Simulaciones para acción exterior distribuida . . . . .	204
7.3.3.	Simulaciones para acción exterior puntual . . . . .	210
7.4.	Simulación reducida de un acuífero heterogéneo de geometría regular sometido a acciones exteriores sencillas mediante el MLAN . . . . .	211
7.4.1.	Generación del subespacio de Krylov de reducción . . . . .	211
7.4.2.	Análisis de los resultados de las simulaciones . . . . .	216
7.5.	Conclusiones y discusión . . . . .	220
<b>8.</b>	<b>Modelación reducida del flujo subterráneo en un acuífero heterogéneo bidimensional</b> . . . . .	<b>223</b>
8.1.	Introducción . . . . .	223
8.2.	Campo de transmisividad . . . . .	224
8.3.	Modelos conceptuales de los acuíferos de prueba . . . . .	224
8.3.1.	Geometría de las condiciones de contorno, la conexión río-acuífero y discretización espacial . . . . .	224
8.3.2.	Parámetros hidráulicos . . . . .	226
8.3.3.	Acciones exteriores . . . . .	228
8.3.4.	Condiciones iniciales . . . . .	230
8.3.5.	Parámetros de control . . . . .	230
8.4.	Aplicación del MAV-CSEM a la reducción de modelos de flujo subterráneo . . . . .	231
8.4.1.	Solución de los problemas de autovalores, generación de modos efectivos y enmascaramiento de modelos reducidos . . . . .	231

---

8.4.2. Análisis de las simulaciones reducidas por el MAV-CSEM . . . . .	247
8.5. Aplicación del MLAN a la reducción de los modelos de flujo subterráneo . .	261
8.5.1. Generación de los subespacios racionales de Krylov . . . . .	261
8.5.2. Análisis de las simulaciones reducidas por el MLAN . . . . .	273
8.6. Conclusiones y discusión . . . . .	287
<b>9. Conclusiones y futuras líneas de investigación</b>	<b>293</b>
9.1. Conclusiones . . . . .	293
9.2. Futuras líneas de investigación . . . . .	298
<b>Referencias</b>	<b>301</b>