



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Máster en Ingeniería
Hidráulica y Medio
Ambiente

Título del Trabajo Fin de Máster:

*Análisis y adaptación de algoritmos para la
optimización de sistemas de recursos
hídricos mediante técnicas de redes de flujo.
Aplicación en la mejora y ampliación del
modelo OPTIGES*

Intensificación:

RECURSOS HÍDRICOS

Autor:

DAVID HARO MONTEAGUDO

Director/es:

JAVIER PAREDES ARQUIOLA

ABEL SOLERA SOLERA

Fecha: SEPTIEMBRE, 2011



Título del Trabajo Fin de Máster:

Análisis y adaptación de algoritmos para la optimización de sistemas de recursos hídricos mediante técnicas de redes de flujo. Aplicación en la mejora y ampliación del modelo OPTIGES

Autor: **HARO MONTEAGUDO, DAVID**

Tipo	A <input type="checkbox"/> B <input checked="" type="checkbox"/>	Lugar de Realización	VALENCIA
Director	JAVIER PAREDES ARQUIOLA	Fecha de Lectura	SEPT, 2011
Codirector1	ABEL SOLERA SOLERA		
Codirector2			
Tutor			

Resumen:

La distribución del agua entre los diferentes usos es un problema habitual en numerosas cuencas hidrológicas. El objetivo es obtener la distribución óptima de los recursos y los flujos circulantes por el sistema asociados. Existe una gran variedad de técnicas de optimización que permiten resolver este problema. De entre todas ellas, las redes de flujo es una de las más habitualmente empleadas en la resolución del problema del reparto de recursos hidráulicos. Este método de optimización se ha empleado en numerosas ocasiones para desarrollar aplicaciones para sistemas de recursos concretos, así como para crear sistemas de soporte a la decisión genéricos para el estudio de modelos de cuencas creados para los mismos. En este trabajo se han estudiado diversos algoritmos de resolución de redes de flujo, de los cuales se seleccionó tres (Out-of-Kilter, RELAX IV y NETFLOW) para ser comparados entre sí en la resolución de un sistema de recursos hídricos sencillo. Se empleó el modelo OPTIGES como base para la incorporación de los algoritmos, obteniéndose que RELAX IV resulta el más eficiente de los tres en la resolución del problema. Dado que muchos aspectos de una cuenca hidrográfica no son puramente lineales, el estudio de las no linealidades resulta de gran importancia en la optimización de estos sistemas. Por lo tanto, también se estudió el funcionamiento de los algoritmos escogidos al resolver el mismo problema añadiéndose dos no linealidades sencillas como son la evaporación y los retornos, con resultados idénticos al caso lineal. Por último, se ha desarrollado un módulo adicional para considerar los acuíferos en el sistema, elementos altamente no lineales pero de gran importancia en muchas cuencas.

Summary

The distribution of water resources between different users is a traditional problem in many river basins. The objective is obtaining the optimal resource distribution and its associated circulating flows through the system. There is a great variety of optimization techniques that allow solving this problem such as linear and non-linear programming, network flow programming, dynamic programming and other heuristic methods like genetic algorithms, neural networks and fuzzy logic. Among all the existing, network flow programming is a common technique to solve the optimal water allocation problem. This optimization method has been used many times for developing applications for concrete water systems, as well as for developing generic decision support systems to study basin models created for them. Several network flow algorithms were studied in this work, and three were chosen (Out-of-Kilter, RELAX IV and NETFLOW) for comparing their performance by solving a



simple river system problem. The OPTIGES model was used as a base for the implementation of the algorithms, and obtaining that RELAX IV is the most efficient in solving the problem. As long as many aspects of a river basin are not purely linear, the study of non-linearities will also be of great importance in water resources systems optimization. Therefore, also the performance of the chosen algorithms was studied by solving the same problem including two easy non-linearities such as evaporation and returns, and obtaining identical results than in the linear case. Finally, an additional module for considering aquifers in the system was developed because, although being highly non-linear elements, they are of great importance in many river basins.

Resum

La distribució de l'aigua entre els diferents usos és un problema habitual en nombroses conques hidrològiques. L'objectiu és obtindre la distribució òptima dels recursos i els fluxos circulants associats pel sistema. Existeix una gran varietat de tècniques d'optimització que permeten resoldre aquest problema. Entre totes elles, les xarxes de flux és una de les més habitualment empleades en la resolució del problema del repartiment de recursos hidràulics. Aquest mètode d'optimització s'hi ha empleat en nombroses ocasions per desenvolupar aplicacions per a sistemes de recursos concrets, així com per a crear sistemes de suport a la decisió genèrics per l'estudi de models de conques creats per als mateixos. En aquest treball s'han estudiat diversos algorismes de resolució de xarxes de flux, dels qui es va seleccionar tres (Out-of-Kilter, RELAX IV y NETFLOW) per a ser comparats entre ells en la resolució d'un sistema de recursos hídrics senzill. Es va utilitzar el model OPTIGES com a base per a la incorporació dels algorismes, obtenint-se que RELAX IV resulta el més eficient dels tres en la resolució del problema. Donat que molts aspectes d'una conca hidrogràfica no són purament lineals, l'estudi de les no linealitats resulta de gran importància en l'optimització d'aquests sistemes. Per tant, també es va estudiar el funcionament dels algorismes escollits al resoldre el mateix problema afegint dues no linealitats senzilles com són l'evaporació y els retorns, amb resultats idèntics al cas lineal. Per últim, s'hi ha desenvolupat un mòdul addicional per a considerar els aqüífers al sistema, elements altament no lineals però de gran importància en moltes conques.

Palabras clave:

Optimización, Redes de flujo, No linealidades, Water Allocation

Prefacio

En el documento que se presenta a continuación se desarrollan las tareas realizadas durante el desarrollo del trabajo de final de máster titulado *“Análisis y adaptación de algoritmos para la optimización de sistemas de recursos hídricos mediante técnicas de redes de flujo. Aplicación en la mejora y ampliación del modelo OPTIGES”*.

Este trabajo se ha realizado con la motivación de finalizar los estudios, y la obtención del título correspondiente, del Máster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, con intensificación en Sistemas de Recursos Hídricos, impartido por el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia. Además, el trabajo se enmarca como un paso previo, y necesario, al desarrollo futuro de una tesis doctoral que se debería desarrollar al hilo de las temáticas tratadas en el mismo.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer, en primer lugar, la confianza depositada en mí por parte de los profesores Joaquín Andreu, Javier Paredes y Abel Solera, quienes me alentaron a trabajar con ellos en el grupo de sistemas de recursos hídricos del departamento, que me han guiado durante el desarrollo del trabajo de fin de máster y cuya orientación resultará inestimable en el futuro cuando encare el camino de desarrollar una tesis doctoral.

En segundo lugar, también agradezco al resto de compañeros becarios (o similares) del departamento el simple hecho de estar aquí, ya que pese a que cada uno trabajamos en temáticas distintas, aunque relacionadas, todos juntos logramos que la vida en el despacho sea mucho más llevadera y divertida.

Por último, y no por ello menos importante, agradezco, como siempre, el apoyo de mis padres y familiares por respaldarme en las decisiones que tomo, a pesar de las posibles desavenencias que de tanto en tanto se puedan dar.

Índice general

1. Introducción	15
2. Situación actual de la optimización de sistemas de recursos hídricos.....	19
3. El problema de asignación de recursos hídricos y las redes de flujo. El modelo OPTIGES.	29
4. Análisis de algoritmos de resolución de redes de flujo para la optimización de esquemas de recursos hídricos.	35
5. Aplicación de los algoritmos de resolución de redes de flujo escogidos en la optimización de un sistema de recursos sencillo.	49
6. Incorporación de la modelación de acuíferos en el modelo OPTIGES	71
7. Conclusiones.....	95
Referencias	99
Apéndices	103

Índice detallado

1.	Introducción	15
2.	Situación actual de la optimización de sistemas de recursos hídricos.....	19
3.	El problema de asignación de recursos hídricos y las redes de flujo. El modelo OPTIGES.	29
4.	Análisis de algoritmos de resolución de redes de flujo para la optimización de esquemas de recursos hídricos.	35
4.1.	Algoritmos de optimización de redes de flujo.....	36
4.1.1.	Out-of-Kilter.....	37
4.1.2.	Relax-IV.....	39
4.1.3.	NETFLO (SIMPLEX)	41
4.1.4.	Generalized Network Algorithm (EMNET y NETPD).....	42
4.1.5.	Otros algoritmos.....	43
4.2.	Comparación según la bibliografía	43
4.3.	Limitaciones de las redes de flujo.....	45
4.4.	Consideraciones adicionales.....	45
5.	Aplicación de los algoritmos de resolución de redes de flujo escogidos en la optimización de un sistema de recursos sencillo.	49
5.1.	Caso de estudio: La cuenca del río Mijares simplificada	50
5.2.	Optimización del sistema sin iteraciones	52
5.3.	Introducción de no linealidades en la optimización del sistema.....	57
5.3.1.	Optimización del sistema teniendo en cuenta los retornos de las demandas.	58
5.3.2.	Optimización del sistema teniendo en cuenta la evaporación en los embalses.....	61
5.3.3.	Optimización del sistema teniendo en cuenta evaporación y retornos. .	64
5.4.	Análisis de resultados.	65
5.5.	Consideraciones finales del capítulo 5.....	69
6.	Incorporación de la modelación de acuíferos en el modelo OPTIGES	71
6.1.	Cambios internos introducidos en el modelo.....	72
6.2.	Contribución de los nuevos elementos a la función objetivo	73

6.2.1.	Contribución de las filtraciones de los embalses y en los tramos tipo 2 y 3 73	
6.2.2.	Contribución de las filtraciones de las demandas consuntivas.....	74
6.2.3.	Contribución de las recargas artificiales.....	74
6.2.4.	Contribución de los bombeos a las demandas y de los bombeos adicionales.....	75
6.3.	Subrutina de simulación de acuíferos ACUIFERO.....	75
6.3.1.	Modelos de acuíferos incluidos en la subrutina.....	76
6.3.2.	Criterio de convergencia de los cálculos.....	76
6.4.	Otras subrutinas modificadas.....	80
6.5.	Tests de funcionamiento. Aplicación a un caso sencillo.....	80
6.5.1.	Test de funcionamiento 1. Comprobación de que la red de flujo no destina recursos a la recarga del acuífero a través de los tramos conectados al mismo.	81
6.5.2.	Test de funcionamiento 2. Funcionamiento del modelo y comportamiento del acuífero en un sistema completo sin limitación de los bombeos por parámetros de control.....	84
6.5.3.	Test de funcionamiento 3. Control de los bombeos mediante parámetros de control.....	89
6.6.	Tiempo de cálculo y convergencia de los resultados.....	91
6.7.	Consideraciones finales del capítulo 6.....	93
7.	Conclusiones.....	95
	Referencias.....	99
	Apéndices.....	103
	Apéndice A. El modelo OPTIGES de optimización de la gestión de esquemas de recursos hídricos.....	105
	A.1.1. Nudos.....	106
	A.1.2. Conducciones.....	106
	A.1.3. Aportaciones.....	106
	A.1.4. Demandas.....	107
	A.1.5. Elementos de retorno.....	107
	A.1.6. Optimización y función objetivo.....	107
	A.2. Elementos no lineales.....	108
	A.3. Resultados.....	108

A.4. Aplicaciones prácticas del modelo OPTIGES	109
A.5. Limitaciones del modelo OPTIGES.....	109
Apéndice B. Transcripción de la subrutina ACUIFERO	111
Apéndice C. Archivo de datos DATGEN para la ejecución del modelo completo de OPTIGES en el capítulo 5	117
Apéndice D. Gráficas de resultados del test de funcionamiento 1 (apartado 5.5.1)...	121
D.1. Resultados del caso en que el bombeo sólo cubre el primer nivel de la demanda agrícola (50%)	121
D.2. Resultados del caso en que el bombeo cubre hasta el segundo nivel de la demanda agrícola (70%).....	125
D.3. Resultados del caso en que el bombeo cubre hasta el tercer nivel de la demanda agrícola (90%).....	128
D.4. Resultados del caso en que el bombeo cubre el 100% de la demanda.....	132
D.5. Aportaciones del sistema en los cuatro casos	135
Apéndice E. Gráficas de resultados del test de funcionamiento 2 (apartado 5.5.2). ..	137
E.1. Resultados del caso en que el bombeo sólo cubre el primer nivel de la demanda agrícola (50%)	137
E.2. Resultados del caso en que el bombeo cubre hasta el segundo nivel de la demanda agrícola (70%).....	140
E.3. Resultados del caso en que el bombeo cubre hasta el tercer nivel de la demanda agrícola (90%)	142
E.4. Resultados del caso en que el bombeo cubre el 100% de la demanda	145
E.5. Aportaciones del sistema en los cuatro casos.....	147

Lista de figuras

Figura 2.1 Procedimientos de optimización estocástica implícita (a) y explícita (b). Traducidos de Labadie (2004)	21
Figura 3.1 Ejemplo de sistema de recursos hídricos	29
Figura 3.2. Representación del esquema de recursos hídricos en la figura 3.1 en forma de red de flujo	31
Figura 3.3. Grafo multiperiodo del sistema de recursos representado en la figura 3.1	32
Figura 5.1 Situación de la cuenca del río Mijares.....	50
Figura 5.2. Modelo del sistema del Mijares creado con AQUATOOL para su ejecución con el programa SIMGES.	51
Figura 5.3. Evolución del tiempo de ejecución de los algoritmos con el tamaño de la red de flujo.....	53
Figura 5.4. Volumen total regulado en el sistema sin iteraciones con los tres algoritmos para el periodo de optimización correspondiente a 720 meses. No se observa ninguna diferencia entre ninguno de ellos.....	55
Figura 5.5. Evolución del volumen almacenado en el embalse de Arenós, durante el periodo de optimización de 720 meses, para cada uno de los tres algoritmos comparados.	56
Figura 5.6. Evolución del volumen almacenado en el embalse de Sichar, durante el periodo de optimización de 720 meses, para cada uno de los tres algoritmos comparados.	57
Figura 5.7. Modelo simplificado del sistema Mijares modificado para la inclusión de elementos de retorno.....	59
Figura 5.8. Evolución del valor de la función objetivo con el número de iteraciones para el horizonte de optimización de 720 meses.....	59
Figura 5.9. Tiempo de ejecución del modelo de optimización con cada algoritmo para el horizonte de optimización de 720 meses.....	61
Figura 5.10. Tiempo de ejecución de cada iteración del modelo de optimización con cada algoritmo para el horizonte de optimización de 720 meses.	61
Figura 5.11. Evolución del valor de la función objetivo con cada iteración para un horizonte de optimización de 720 meses.....	63
Figura 5.12. Evolución del valor de la función objetivo con cada iteración para un horizonte de optimización de 720 meses.....	64
Figura 5.13. Número de iteraciones según el valor de la variable NEPSI.....	67
Figura 5.14. Evolución del valor de la función objetivo a lo largo de 200 iteraciones con OPTIGES con RELAX-IV.....	69
Figura 6.1 Representación del conjunto de arcos y nudos que se incluyen en la red de flujo y las entradas y salidas que éste tiene	72

Figura 6.2. Diagrama de flujo de la rutina VALMOD con la incorporación de los acuíferos	77
Figura 6.3. Diagrama de flujo de la nueva rutina ACUIFERO incluida en OPTIGES	78
Figura 6.4. Diagrama de flujo correspondiente a la comprobación de los parámetros de control dentro de la rutina ACUIFERO.....	79
Figura 6.5. Esquema del sistema de recursos hídricos empleados en el caso de aplicación.....	80
Figura 6.6. Esquema del sistema modificado	82
Figura 6.7. Resultados de caudales entre el embalse y el acuífero para un nivel de bombeo igual a 4	83
Figura 6.8. Evolución del volumen del acuífero calculado a partir de la red de flujo para cada uno de los niveles de bombeo permitidos comparado con los resultados de simulación.....	85
Figura 6.9. Caudal entre río y acuífero, calculado (azul) y demandado (rojo), para cada uno de los 4 niveles de bombeo permitidos	86
Figura 6.10. Aportación mensual media en la cuenca desagregada durante los 60 años del periodo de optimización frente a la demanda total desagregada.....	88
Figura 6.11. Evolución del volumen en el acuífero para la situación en que el bombeo cubre hasta el 90% de la demanda agrícola y no existen limitaciones sobre el mismo.	90
Figura 6.12. Déficit acumulado para el caso en que no existen limitaciones a los bombeos y cuando se impide bombear por debajo de -45 Hm3.....	91
Figura 6.13. Tiempo de ejecución acumulado para cada uno de las pruebas realizadas con el sistema de recursos simplificado, correspondiéndose N1 con el primer nivel de demanda y así sucesivamente.....	92
Figura 6.14. Tiempo de ejecución de la herramienta OPTIGES para diferentes valores de umbral (sin umbral, -60 Hm3, -50 Hm3 y -45 Hm3) para un nivel de bombeo capaz de suministrar hasta el 90% de la demanda agrícola.....	93
Figura D.1. Volumen almacenado mes a mes en el acuífero	121
Figura D.2. Caudal entre río y acuífero (positivo del acuífero al río y negativo del río al acuífero).....	122
Figura D.3. Volumen bombeado a la demanda agrícola	122
Figura D.4. Volumen mensual almacenado en el embalse	123
Figura D.5. Déficit anual de la demanda agrícola.....	123
Figura D.6. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Abajo.....	124
Figura D.7. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Afuera	124
Figura D.8. Volumen almacenado mes a mes en el acuífero	125
Figura D.9. Caudal entre río y acuífero (positivo del acuífero al río y negativo del río al acuífero).....	125
Figura D.10. Volumen bombeado a la demanda agrícola	126
Figura D.11. Volumen mensual almacenado en el embalse	126
Figura D.12. Déficit anual de la demanda agrícola.....	127

Figura D.13. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Abajo	127
Figura D.14. Déficit Anual de la demanda urbana de Villa Afuera	128
Figura D.15. Volumen almacenado mes a mes en el acuífero	128
Figura D.16. Caudal entre río y acuífero (positivo del acuífero al río y negativo del río al acuífero).....	129
Figura D.17. Volumen bombeado a la demanda agrícola	129
Figura D.18. Volumen mensual almacenado en el embalse	130
Figura D.19. Déficit anual de la demanda agrícola.....	130
Figura D.20. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Abajo.....	131
Figura D.21. Déficit Anual de la demanda urbana de Villa Afuera	131
Figura D.22. Volumen almacenado mes a mes en el acuífero	132
Figura D.23. Caudal entre río y acuífero (positivo del acuífero al río y negativo del río al acuífero).....	132
Figura D.24. Volumen bombeado a la demanda agrícola	133
Figura D.25. Volumen mensual almacenado en el embalse	133
Figura D.26. Déficit anual de la demanda agrícola.....	134
Figura D.27. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Abajo.....	134
Figura D.28. Déficit Anual de la demanda urbana de Villa Afuera	135
Figura D.29. Aportación en cabecera	135
Figura D.30. Aportación en embalse	136
Figura D.31. Recarga natural del acuífero	136
Figura E.1. Volumen bombeado a la demanda agrícola.....	137
Figura E.2. Volumen mensual almacenado en el embalse.....	138
Figura E.3. Déficit anual de la demanda agrícola	138
Figura E.4. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Abajo	139
Figura E.5. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Afuera.....	139
Figura E.6. Volumen bombeado a la demanda agrícola.....	140
Figura E.7. Volumen mensual almacenado en el embalse.....	140
Figura E.8. Déficit anual de la demanda agrícola	141
Figura E.9. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Abajo	141
Figura E.10. Déficit Anual de la demanda urbana de Villa Afuera	142
Figura E.11. Volumen bombeado a la demanda agrícola.....	142
Figura E.12. Volumen mensual almacenado en el embalse.....	143
Figura E.13. Déficit anual de la demanda agrícola	143
Figura E.14. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Abajo	144
Figura E.15. Déficit Anual de la demanda urbana de Villa Afuera	144
Figura E.16. Volumen bombeado a la demanda agrícola.....	145
Figura E.17. Volumen mensual almacenado en el embalse.....	145
Figura E.18. Déficit anual de la demanda agrícola	146
Figura E.19. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Abajo	146
Figura E.20. Déficit Anual de la demanda urbana de Villa Afuera	147

Figura E.21. Aportación en cabecera.....	147
Figura E.22. Aportación en embalse.....	148
Figura E.23. Aportación de la cuenca media	148
Figura E.24. Aportación total en la cuenca.....	149
Figura E.25. Recarga natural del acuífero.....	149

Lista de tablas

Tabla 5.1 Tamaño de la red correspondiente a cada horizonte de optimización.....	53
Tabla 5.2. Evolución del tiempo de ejecución de los algoritmos con el tamaño de la red de flujo.....	54
Tabla 5.3. Relación entre los tiempos de ejecución de los algoritmos según el tamaño de la red de flujo.....	54
Tabla 5.4. Volumen total retornado por las demandas a través de cada elemento de retorno para el horizonte de optimización de 720 meses.	60
Tabla 5.5. Déficit total en cada demanda para el horizonte de optimización de 720 meses.....	60
Tabla 5.6. Volumen total vertido al mar a través de la última conducción del sistema para el horizonte de optimización de 720 meses.	60
Tabla 5.7. Tasa de evaporación en los embalses del modelo.	62
Tabla 5.8. Volumen total evaporado en los embalses para un horizonte de optimización de 720 meses.....	63
Tabla 5.9. Déficit total en cada demanda para el horizonte de optimización de 720 meses.....	63
Tabla 5.10. Volumen total vertido al mar a través de la última conducción del sistema para el horizonte de optimización de 720 meses.	63
Tabla 5.11. Volumen total evaporado en los embalses para un horizonte de optimización de 720 meses.	65
Tabla 5.12. Volumen total retornado por las demandas a través de cada elemento de retorno para el horizonte de optimización de 720 meses.	65
Tabla 5.13. Déficit total en cada demanda para el horizonte de optimización de 720 meses.....	65
Tabla 5.14. Volumen total vertido al mar a través de la última conducción del sistema para el horizonte de optimización de 720 meses.	65
Tabla 5.15. Volumen total evaporado en los embalses para un horizonte de optimización de 720 meses.....	67
Tabla 5.16. Volumen total retornado por las demandas a través de cada elemento de retorno para el horizonte de optimización de 720 meses.....	67
Tabla 5.17. Déficit total en cada demanda para el horizonte de optimización de 720 meses.....	68
Tabla 4.18. Volumen total vertido al mar a través de la última conducción del sistema para el horizonte de optimización de 720 meses.	68
Tabla 6.1. Valores mensuales de la demanda del caso de estudio	81
Tabla 6.2. Garantías asociadas a las diferentes demandas del sistema para un nivel de bombeos que cubre hasta el 50% de la demanda agrícola.....	87

Tabla 6.3. Garantías asociadas a las diferentes demandas del sistema para un nivel de bombeos que cubre hasta el 90% de la demanda agrícola.....	89
Tabla 6.4. Tamaño de la red de flujo asociada a los dos esquemas de recursos hídricos empleados en este capítulo	91

1. Introducción

En 1992, en el prefacio del libro titulado “Conceptos y Métodos para la planificación hidrológica”, Joaquín Andreu, editor del mismo, escribió:

“La gestión de los recursos naturales, uno de los cuales es el agua, es una actividad de importancia primordial en el mundo actual. La disponibilidad y calidad del agua condicionan, entre otros aspectos importantes de la calidad de vida y de la economía, los niveles de salud y bienestar público, y las producciones agraria, industrial y energética. Dentro de la gestión, la planificación es una de las tareas más críticas. La evolución de la Planificación Hidrológica y el incremento de complejidad de los sistemas debido a la inclusión de objetivos y usos múltiples y posiblemente conflictivos, hacen imprescindible el uso de técnicas de desarrollo relativamente recientes como herramientas para la solución de problemas complejos.”

Esta cita, que se encuentra más que cercana a cumplir 20 años, se podría haber escrito perfectamente hace unos pocos días. Y es que la gestión de los recursos naturales, y por ende la planificación hidrológica, sigue siendo un aspecto de suma importancia, si no mayor, en el mundo de 20 años después.

La planificación hidrológica es un requerimiento legal que se establece con los objetivos generales de conseguir el buen estado y la adecuada protección de las masas de agua de una cuenca, la satisfacción de las demandas de agua y el equilibrio y armonización del desarrollo regional y sectorial. Estos objetivos han de alcanzarse incrementando las disponibilidades del recurso, protegiendo su calidad, economizando su empleo y racionalizando sus usos en armonía con el medio ambiente y los demás recursos naturales.

Para la consecución de los objetivos, la planificación hidrológica se guiará por criterios de sostenibilidad en el uso del agua mediante la gestión integrada y la protección a largo plazo de los recursos hídricos, prevención del deterioro del estado de las aguas, protección y mejora del medio acuático y de los ecosistemas acuáticos y reducción de la contaminación. Asimismo, la planificación hidrológica contribuirá a paliar los efectos de las inundaciones y sequías.

El desarrollo de modelos que ayuden a lograr una mayor comprensión de un sistema de recursos hidráulicos y su funcionamiento es una práctica habitual en el proceso de planificación que sirve de gran ayuda para la consecución de los objetivos arriba mencionados, a la vez que se respetan los criterios impuestos. Además, la modelación del sistema provee una forma, quizá la principal, de predecir el comportamiento futuro del sistema o de sus posibles modificaciones (Loucks 1992). La modelación de sistemas

de recursos hídricos implica el desarrollo de un marco matemático o computacional para describir un sistema en particular y su operación para poder estudiar, identificar y evaluar las posibles soluciones a los problemas existentes en dicho sistema.

Dos tipos de modelos suelen utilizarse para el estudio de los sistemas de recursos hídricos, los de simulación y los de optimización. El objetivo de los primeros es simular con todo detalle el funcionamiento del sistema con unas reglas de gestión dadas, mientras que el de los de optimización es encontrar la gestión óptima del sistema y, calcular los flujos y almacenamientos de agua en tal situación. En esta tesina de máster se va a prestar atención únicamente a este segundo grupo de modelos.

Al enfrentarse a un problema de planificación hidrológica de un determinado sistema de recursos hídricos, lo más habitual es contar con uno o varios objetivos que se desea alcanzar en base a unas medidas de efectividad, o la forma de valorar el cumplimiento de los objetivos. Así pues, el camino a seguir pasa por definir diferentes alternativas y la forma de evaluar cada una de ellas y, finalmente, decidir cuál de ellas constituirá el plan de acción.

Problemas como el descrito de forma general en el anterior párrafo se dan prácticamente en toda cuenca hidrográfica en la que los recursos no sean ilimitados (o al menos mucho mayores que los usos del agua), y que prácticamente supone la mayoría de cuencas del mundo. Normalmente se tendrá una cantidad de recurso limitada y una serie de usos del agua que pugnarán por dicho recurso, además de existir ciertas restricciones impuestas por las limitaciones físicas del propio sistema o por requerimientos de caudal en determinados puntos del mismo. Ante este panorama, un gestor de los recursos hídricos normalmente deseará saber cuál será la distribución óptima de caudales que maximice los beneficios del uso del agua en el sistema, que minimice los costes y de un suministro adecuado a todas las demandas. Este problema es denominado en la literatura en inglés como “water allocation problem”, cuya traducción puede aproximarse como “problema de reparto del recurso hídrico”. Y es, en este punto, donde entran en juego los modelos de optimización.

Un modelo de optimización obtiene los valores óptimos de las variables de control definidas para el sistema, que habitualmente son los flujos circulantes por el mismo. A diferencia de los de optimización, los modelos de simulación al ser una técnica de prueba y error, no es seguro que se vaya a dar con el mejor valor. No obstante, por ser el proceso matemático de optimización un proceso muy laborioso y que, en muchos casos, su planteamiento requiere concepciones simplificadas importantes del sistema, su nivel de detalle es mucho menor que el que se puede conseguir en un modelo de simulación.

Sin embargo, los continuos avances en técnicas de computación y en la velocidad de las propias computadoras hacen que los procesos de cálculo matemático, pese a seguir siendo igual de laboriosos, puedan resolverse, cada vez, en un tiempo mucho menor.

Existe, en la actualidad, una gran cantidad de técnicas de optimización que pueden aplicarse para resolver el problema de reparto de recursos en una cuenca hidrográfica de las que se hablará con más detenimiento en el próximo capítulo. Para el desarrollo de esta tesina se ha escogido la técnica de las redes de flujo, una forma eficiente de programación lineal, que resulta muy adecuada para la optimización de esquemas de sistemas de recursos hídricos por la gran similitud existente entre éstos y las redes se que resuelven empleando esta técnica.

Con la idea de emplear la técnica de las redes de flujo para resolver el problema de asignación de recursos en esquemas de sistemas lo más detallados posible, los objetivos que se persiguen con este trabajo son: 1) encontrar un algoritmo que permita resolver redes de flujo basadas en esquemas de recursos hídricos de manera adecuada y en un tiempo razonablemente reducido; y 2) emplearlo como motor de cálculo de un modelo de optimización de sistemas de recursos hídricos con un alto nivel de representación de los diferentes elementos que se pueden encontrar habitualmente.

Para lograr estos objetivos, se analizarán diversos algoritmos de resolución de redes de flujo presentes en la literatura científica y se seleccionarán los más prometedores para emplearlos como motor de cálculo de un modelo de optimización de esquemas de recursos hídricos. Posteriormente, se realizará una comparación práctica entre los tres con la resolución de un problema de optimización de un esquema relativamente sencillo, de forma que pueda decidirse entre uno de ellos para pasar a formar parte definitivamente del modelo general. Finalmente, se desarrollará un módulo adicional para la incorporación de los acuíferos al modelo de optimización de forma que se incremente la representatividad de los futuros desarrollos y se mostrará su funcionamiento con el nuevo algoritmo escogido.

Esta tesina de final de máster se enmarca dentro de los trabajos de mejora y ampliación del modelo OPTIGES de optimización de la gestión de esquemas de recursos hídricos. Este modelo constituirá la base para el desarrollo de los trabajos descritos en este texto, de forma que no sea necesario desarrollar un modelo nuevo desde cero.

El grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia lleva desarrollando el modelo OPTIGES de optimización de la gestión de sistemas de recursos hídricos desde 1992. Este modelo, incluido en el Sistema de Soporte a la Decisión AQUATOOL DMA, hace uso del algoritmo Out-of-Kilter (Ford y Fulkerson 1962) para obtener la

distribución óptima del flujo a través de la red asociada a un esquema de recursos hídricos creado con la interfaz gráfica. Además, OPTIGES incluye la posibilidad de modelar dos procesos no lineales, la evaporación de los embalses y los retornos de las demandas, que se resuelven mediante la resolución iterativa de la red de flujo hasta alcanzarse la convergencia de los resultados.

El desarrollo de esta herramienta resulta de gran importancia debido, en primer lugar, al interés que suscita el hecho de poder conocer el funcionamiento óptimo de la gestión de un sistema de recursos hídricos representado lo más detalladamente posible, es decir, con todos sus elementos representados en el modelo. En segundo lugar, por la necesidad detectada del desarrollo de modelos que permitan llevar a cabo estudios de optimización de la operación de sistemas de explotación y la cuál AQUATOOL DMA en general, y el modelo OPTIGES en particular, pueden suplir.

2. Situación actual de la optimización de sistemas de recursos hídricos.

Un sistema de recursos hídricos se entiende, desde el punto de vista de la gestión del mismo, como un sistema uni o multi embalse compuesto por diversos componentes físicos tales como embalses, canales, túneles, tuberías, estaciones de bombeo, plantas hidroeléctricas, zonas de regadío y sistemas de suministro urbano (demandas), que se opera para suministrar agua para su uso urbano, agrícola e industrial, para la producción de energía hidroeléctrica, para el control de avenidas y para cumplir determinados requisitos ecológicos, sin olvidarnos de las necesidades de posibilitar la navegación o los usos recreativos.

La optimización de un sistema de recursos hídricos conlleva pues el reparto de los recursos, el desarrollo de estrategias de regulación de caudales y reglas de operación de embalses, y la toma de decisiones en tiempo real sobre qué desembalses realizar en base a las reglas de operación definidas (Wurbs, 1993). El objetivo final de la optimización del sistema es maximizar el beneficio, minimizar costes, suministrar a todas las demandas, a la vez que se cumple la ecuación del balance de masas del sistema, así como otras restricciones más particulares (Rani, 2010).

Para alcanzar estos objetivos resulta de inestimable ayuda la utilización de herramientas informáticas y modelos matemáticos que nos permitan (o faciliten) llevar a cabo el proceso de optimización. Aunque los modelos de simulación actuales nos permiten analizar cuestiones del tipo “¿qué pasaría si...?” relacionadas con el funcionamiento de diferentes alternativas de operación, no pueden, sin embargo, ayudarnos a obtener cuál es la mejor estrategia de utilización de dichas alternativas. Los modelos de optimización, por otro lado, si que tienen esa capacidad de, sistemáticamente, seleccionar cuál es la solución óptima, o qué familia de soluciones lo es, bajo una serie de objetivos y restricciones predeterminados.

La principal tarea de un modelo de optimización es obtener el mejor valor (máximo o mínimo) de una función cuyos componentes representan variables de control (o decisión) así como diferentes parámetros que representen los diferentes pesos que pueden tener las variables anteriormente nombradas. Esta función recibe el nombre de función objetivo, y es el corazón de todo modelo de optimización (Wurbs, 1993). Una formulación generalista de una función objetivo sería (Labadie, 2004):

$$\max (o \min) \sum_{t=1}^T \alpha_t f_t(\mathbf{s}_t, \mathbf{r}_t) + \alpha_{T+1} \varphi_{T+1}(\mathbf{s}_{T+1})$$

donde \mathbf{r}_t es el conjunto n-dimensional de variables de control (o decisión) durante el periodo t ; T es el horizonte de operación; \mathbf{s}_t representa el vector almacenamiento del sistema al inicio del periodo t ; $f_t(\mathbf{s}_t, \mathbf{r}_t)$ es la función objetivo a ser maximizada (o minimizada); $\varphi_{T+1}(\mathbf{s}_{T+1})$ es el término final representando los beneficios (o costes) futuros, más allá del horizonte de optimización; y α_t los factores de descuento para determinar el valor presente de los beneficios (o costes) futuros. Esta función objetivo, según las variables que se manejen, podrá ser lineal o no lineal.

El problema de optimización no termina con la función objetivo. Por lo general, la obtención de los valores de las variables de control también depende de cumplir una serie de restricciones como vienen a ser cumplir la ecuación del balance de materia o limitaciones de flujo máximo o mínimo. Por lo tanto, se optimizará la función objetivo (maximizándola o minimizándola) estando sujetos a las restricciones que limiten la selección de valores de las variables de decisión.

A diferencia con los modelos de simulación, la principal desventaja de los modelos de optimización es detalle de los mismos. Un modelo de simulación es capaz de representar gran cantidad de elementos presentes en una cuenca, mientras que un modelo de optimización, por la habitual mayor complejidad de los desarrollos matemáticos utilizados para su resolución, suele representar los esquemas de manera mucho más simplificada. Este aspecto hace que, en ocasiones, los resultados de los modelos de optimización se consideren de poca importancia o incluso se llegue a desconfiar de ellos debido a su escasa representatividad en el ámbito práctico (Labadie 2004). Sin embargo, el número de autores y organismos que sí observan la importancia de la optimización de sistemas de recursos hídricos no es reducido. En el propio Libro Blanco del Agua (MMA 2000) se comenta la necesidad de emplear modelos de optimización en el desarrollo de los planes de cuenca, al igual que modelos de simulación. Y una búsqueda a lo largo de los últimos años en la literatura científica muestra que la optimización de sistemas de recursos hídricos no es un tema excluido de la actualidad sino que supone un campo idóneo para la aplicación de las técnicas de optimización más avanzadas y/o recientes: Celeste (2009) explora las posibilidades de diversas técnicas de optimización estocástica para desarrollar curvas de operación para el embalse de Epitácio Pessoa en Brasil; Hinçal (2011) emplea los algoritmos genéticos para optimizar la producción de energía hidroeléctrica en un sistema con tres embalses del río Colorado en Estados Unidos; o Chandra (2009) que desarrolla un modelo híbrido de redes neuronales y lógica difusa para la operación óptima de un embalse en el río Pagladiya en India.

A lo largo de este capítulo se tratarán las diversas técnicas que, a lo largo de las últimas décadas, se han utilizado para resolver el problema de la optimización de sistemas de recursos hídricos. Dichas técnicas pueden dividirse en dos grandes familias, (1) la optimización estocástica implícita, y (2) la optimización estocástica explícita. Los

métodos implícitos realizan la optimización a partir de series hidrológicas históricas o sintéticas largas, o muchas cortas y similares (figura 2.2.a). De esta forma, la mayoría de los aspectos estocásticos del problema, incluyendo las correlaciones espaciales y temporales de las series hidrológicas, están incluidos de forma implícita y, por lo tanto, pueden emplearse directamente métodos de optimización determinísticos. La mayor desventaja del enfoque implícito es que las reglas de operación óptimas obtenidas son válidas únicamente para las series hidrológicas empleadas. Por otro lado, los métodos explícitos están diseñados para operar directamente con descripciones probabilísticas de flujos aleatorios (figura 2.1.b), en lugar de secuencias hidrológicas determinísticas. Esto significa que la optimización se realiza sin la presunción de conocer perfectamente cuáles serán los flujos futuros. Adicionalmente, las reglas de operación óptimas se determinan directamente, sin la necesidad de inferirlas posteriormente de los resultados de la optimización. Sin embargo, los métodos explícitos son computacionalmente mucho más exigentes que los implícitos.

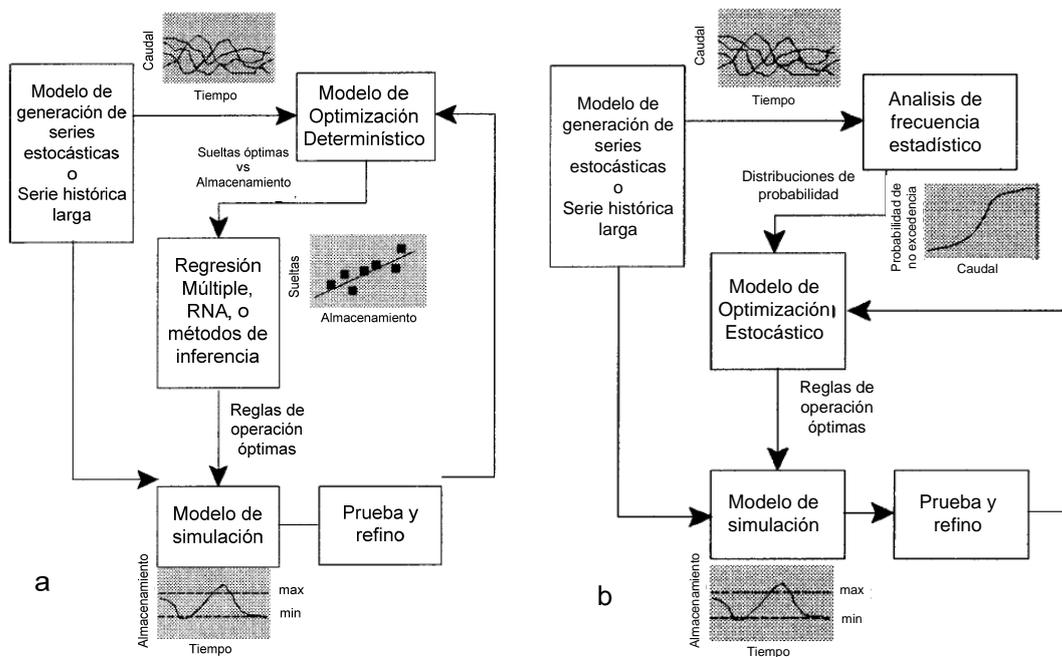


Figura 2.1 Procedimientos de optimización estocástica implícita (a) y explícita (b). Traducidos de Labadie (2004)

La programación lineal es una de las técnicas de optimización más empleadas en la modelación de sistemas de recursos hídricos (Rani, 2010). Se trata de un método de optimización estocástica implícita. Lo más atractivo de esta técnica es su flexibilidad de aplicación a problemas grandes, la convergencia a un óptimo global, la no necesidad de aportar soluciones iniciales, la existencia de una teoría dual sólida para realizar análisis de sensibilidad, y la disponibilidad de numerosas herramientas informáticas relativamente sencillas de utilizar ya creadas, o adaptadas, para su resolución, como por ejemplo CPLEX (IBM), GAMS (<http://www.gams.com>) o MATLAB (<http://www.mathworks.com>), que incluyen entre sus funciones algoritmos de

resolución de problemas de programación lineal, aparte de funciones para otras muchas técnicas relacionadas con la optimización, o no. Por otro lado, la principal desventaja de emplear la programación lineal es que tanto la función objetivo como las restricciones del problema deben ser lineales lo que, unido a que una gran cantidad de aspectos de los sistemas de recursos hídricos tienen un comportamiento no lineal, hace que sea necesario realizar una serie de simplificaciones, aproximaciones e iteraciones, que pueden derivar en un modelo poco preciso del sistema que se desee estudiar.

La programación lineal se puede enfocar también desde el punto de vista probabilístico. El enfoque determinista asume que todos los flujos y fenómenos aleatorios futuros se conocen de antemano. Una aproximación más realista es que las decisiones del primer periodo se pueden tomar con certeza, pero que las decisiones futuras y sus consecuencias son aleatorias. De esta forma puede formularse un problema en dos etapas que trata de minimizar los costes (o maximizar los beneficios) de la primera etapa conocida, más los costes esperados (o beneficios) de las futuras decisiones de una serie de escenarios futuros, cada uno con una probabilidad de ocurrencia asociada. El problema que presenta esta forma de proceder es que un gran número de posibles escenarios futuros resultará, como consecuencia, en un problema lineal extremadamente grande, con el evidente incremento del coste de cálculo.

Un ejemplo de aplicación de programación lineal a la optimización de un sistema de recursos hídricos se encuentra en Devi (2005), en el que se plantea un problema de programación lineal para el reparto de agua óptimo en la cuenca del río Subernarekha (India) de forma que se maximice el beneficio por riego y generación de energía hidroeléctrica. De igual forma, la programación lineal se ha empleado en el desarrollo del modelo de simulación de cuencas WEAP21 (Yates et al. 2005). Tomando como base dicho modelo, que resuelve el reparto óptimo de recursos de manera mensual empleando la programación lineal, se han llevado a cabo diversos estudios como los presentados en Lévíte (2003) para estudiar la gestión óptima de los recursos en la cuenca del río Olifante (Sudáfrica) en diferentes escenarios adaptados al inminente cambio climático.

Como ya se ha comentado, muchos sistemas de recursos hídricos no pueden modelarse de forma realista mediante la linealización de sus componentes, y deben atacarse directamente desde un punto de vista no lineal. Las no linealidades en sistemas de recursos hídricos se dan cuando existen relaciones complejas entre las diferentes variables físicas e hidrológicas, o debido a objetivos específicos que no varían de forma lineal a su satisfacción, un ejemplo habitual de esto es la inclusión generación de energía hidroeléctrica en la función objetivo o en las restricciones del problema. En este punto es donde se hace necesario el empleo de una técnica como la programación no lineal. Esta técnica es similar a la programación lineal, comentada en

los párrafos anteriores, sólo que bien la función objetivo, alguna o varias de las restricciones, o todo a la vez, son no lineales. Por supuesto, esto hace que las técnicas habituales de la programación lineal no sean válidas para la resolución de este tipo de problemas y se tenga que recurrir a técnicas bien diferentes.

Los algoritmos de la programación no lineal más robustos y potentes son, según Labadie (2004):

- Programación lineal sucesiva (o secuencial), donde todas las funciones no lineales se aproximan mediante los dos primeros términos de su serie de Taylor asociada. Las soluciones deben mantenerse dentro de una serie de regiones de confianza para evitar inestabilidades en la convergencia.
- Programación cuadrática sucesiva (o secuencial), que aprovecha la eficiencia de la programación cuadrática y la mayor capacidad de los desarrollos cuadráticos para aproximar funciones no lineales que las relaciones lineales.
- Método Lagrangiano aumentado (o método de los multiplicadores), que emplea una función Lagrangiana similar a la empleada en el método anterior pero mejorada con una serie de términos de penalización de forma que el problema de optimización original se puede reemplazar por una secuencia de problemas de optimización no lineal sin restricciones más sencillos de resolver.
- Método generalizado del gradiente reducido. Es una técnica de búsqueda por gradiente restringida que resuelve un problema de optimización reducido respecto a las variables de decisión del problema original.

Todos los algoritmos comentados requieren que tanto la función objetivo como las restricciones del problema sean derivables, aspecto que resulta problemático en la mayor parte de las ocasiones. Aún así, no resulta necesario el cálculo explícito de las derivadas y bastará la utilización de métodos automáticos de derivación. La mayor desventaja de la programación no lineal es la exigencia computacional de los algoritmos, por lo que esta técnica se emplea de forma implícita y apenas se realiza su extensión a la optimización estocástica explícita. Otra desventaja asociada a la programación no lineal es la posibilidad que existe de no alcanzar siempre un óptimo global de la función objetivo, lo que deja a estos métodos en cierta desventaja frente a otros que sí son capaces de evitar los óptimos locales.

Ejemplos de aplicación de programación no lineal son, por ejemplo: Sun (1995), donde se compara el funcionamiento de un paquete de resolución de problemas de programación no-lineal (MINOS) con el de un algoritmo de optimización de redes de flujo generalizadas (EMNET) en el sistema metropolitano de distribución de agua de Californi concluyendo que, pese a que los resultados de la programación no lineal son adecuados, queda en evidencia que sus requerimientos computacionales son muy exigentes; en Barros (2003) se emplea la programación cuadrática sucesiva para la

optimización del sistema de generación hidroeléctrica en Brasil y se compara con el funcionamiento de un modelo del mismo sistema resuelto mediante programación lineal secuencial; en Ghahraman (2004) se resuelve el reparto de recursos entre varios usos agrícolas incluyendo el balance de agua en el suelo mediante programación no lineal y comparando este último con un modelo simplificado resuelto mediante programación lineal.

Otra técnica que puede resolver el problema de las no linealidades en un sistema de recursos hídricos es la programación dinámica. Esta técnica es un método de optimización para resolver procesos de decisión multi-etapa. La característica más atractiva para la aplicación de este tipo de metodologías en la optimización de sistemas de recursos hídricos es que un problema multi-etapa complejo puede descomponerse en una serie de sub-problemas más simples que pueden resolverse de uno en uno de forma recursiva (Dasgupta et al. 2006), basándose en la solución del problema anterior para obtener la solución del siguiente problema.

La programación dinámica puede emplearse tanto de forma determinística como de forma probabilística. Cuando se emplea la metodología determinística, el estado en la siguiente etapa está completamente determinado por el estado y la política de decisión de la etapa actual. La programación dinámica probabilística difiere de la anterior en que el estado de la etapa siguiente no queda completamente determinado por el estado y la decisión de la política en el estado actual. En lugar de ello, existe una distribución de probabilidad para lo que será el estado siguiente. Sin embargo, esta distribución de probabilidad todavía está completamente determinada por el estado y la decisión de la política del estado actual.

Un problema generalizado de la programación dinámica para su aplicación en sistemas multiembalse o con un periodo de cálculo largo viene representado por la gran cantidad de almacenamiento que requiere, problema normalmente referido como problema de la dimensionalidad. Como para obtener todas las posibilidades es necesario almacenar los resultados de los estados anteriores, en problemas grandes la gran cantidad de resultados darán lugar a estructuras de datos muy grandes. Existen métodos que permiten evaluar previamente qué soluciones serán necesarias para llegar al óptimo de forma que se puede liberar espacio desechando las soluciones que no serán utilizadas.

En la literatura científica de los últimos años se encuentran diversos casos de aplicación de la programación dinámica para la obtención de reglas de operación óptimas en embalses. Por ejemplo Castelleti (2007) combina la programación dinámica con redes neuronales, programación neuro-dinámica para solventar el problema de dimensionalidad comentado en el anterior párrafo y lo aplica a la obtención de nuevas reglas de operación en el sistema del Piave (Italia) que tengan en cuenta los caudales

ecológicos. Galelli (2010) emplea la programación dinámica estocástica para encontrar la gestión óptima del sistema del lago Como (Italia).

Todas las técnicas de optimización comentadas hasta el momento son procesos algorítmicos, lo que significa que emplean procesos bien estructurados y convergentes a una solución a cierta información cuantitativa. En contraste a este tipo de técnicas se tienen los métodos heurísticos. Estos métodos están basados en reglas prácticas, experiencia previa, o varias analogías aplicadas a información tanto cuantitativa como cualitativa. Estos métodos no garantizan la obtención de óptimos locales, sino que tratan encontrar soluciones aceptables o satisfactorias. De todas formas, pueden llegar a obtener soluciones óptimas globales a problemas donde los métodos tradicionales fallarían. Con Inteligencia Computacional se hace referencia a un espectro bastante amplio de metodologías bastante diferenciadas, entre ellas se destacan las siguientes:

- *Algoritmos Genéticos (AG)*: Englobados a su vez en lo que se llaman Algoritmos Evolutivos (AE), los AG se basan en los mecanismos de la selección natural y la evolución genética y son, actualmente, el tipo de AE más empleado dentro de la literatura relacionada con la planificación y gestión de sistemas de recursos hídricos (Nicklow 2010). Pese a que no existe una definición universal, los AG se caracterizan por los siguientes elementos: (1) generar una población inicial de soluciones potenciales, cada una identificada como un cromosoma; (2) evaluación de la función objetivo para cada solución y ordenación de los cromosomas según su aptitud; (3) algún proceso de selección de cromosomas, basado en el orden anterior, para participar en un proceso de reproducción, donde se combina la información de dos o más parejas de soluciones “padre” para generar nuevas soluciones “hijo”; y (4) aplicación de algún grado de mutación en las nuevas soluciones para mantener la diversidad y evitar la convergencia prematura a óptimos globales. Como ya resultará evidente, los elementos descritos representan técnicas inspiradas en la biología como la herencia, la mutación, la selección y el cruce, para alcanzar el valor óptimo del problema. Todos los elementos descritos se repiten en generaciones sucesivas hasta que se alcanza una solución adecuada. Lo que se está consiguiendo es que cada nueva generación tenga mejores características que la generación anterior, emulando el proceso biológico de supervivencia del espécimen más adecuado.

Algunos ejemplos de aplicación de AG son: Chen (2006), donde se desarrolla un AG multiobjetivo para optimizar las reglas de gestión de un embalse multipropósito en Taiwán; Ngo (2007), emplea el algoritmo SCE para optimizar las estrategias de control del embalse de Hoa Binh (Vietnam); o un ejemplo más cercano, el proyecto final de carrera de Lerma (2011), en que se comparan

diversos algoritmos genéticos y se emplean para obtener unas reglas de gestión óptimas de los embalses de las cuencas de los ríos Júcar y Mijares (España).

- *Redes Neuronales Artificiales (RNA)*: Las RNA, aunque no se clasifican como un método de optimización per se, pueden ser útiles como herramienta de análisis de regresión múltiple para determinar reglas de operación óptimas a partir de los resultados de métodos de optimización implícita. Las redes neuronales basan funcionamiento en un paralelismo con el cerebro humano y las múltiples interrelaciones de sus neuronas de forma que, una simple neurona puede no realizar un gran trabajo por sí misma, pero muchas neuronas masivamente interconectadas pueden capturar el dinamismo de procesos muy complejos. Se puede encontrar un desarrollo completo de esta técnica en ASCE (2000, I y II), donde se explica el funcionamiento de las RNA así como sus aplicaciones en el campo de los recursos hídricos.

Respecto a la utilización de las RNA en la obtención de políticas de gestión óptima de sistemas de recursos hídricos se encuentran en la literatura numerosos casos en los que esta técnica se utiliza conjuntamente con otras de las ya explicadas. Por ejemplo, en Chaves (2008) se emplean las RNA junto a los AG para encontrar una estrategia de operación óptima de un embalse en Taiwan, de forma que mediante la utilización de un AG se buscan los mejores parámetros de la RNA que posteriormente se utilizará para obtener las sueltas adecuadas a las demandas y otros objetivos de gestión.

- *Lógica Difusa (LD)*: La LD surge como una herramienta para tratar con problemas en los que los parámetros de decisión son inciertos, imprecisos o basados en aspectos cualitativos. En lugar de emplear ecuaciones complejas, la LD emplea descripciones lingüísticas para definir la relación entre los inputs y los outputs. De esta forma, un embalse puede estar lleno o vacío (0 o 1), pero no queda claro cuándo pasa de un estado a otro, podría también decirse que está lleno cuando se encuentra al 90% de su capacidad o casi vacío cuando se encuentra al 10%. Los conjuntos difusos permiten transformar las descripciones lingüísticas en formas numéricas utilizables para realizar la toma de decisiones posterior. Los rudimentos de esta metodología se pueden encontrar actualmente en numerosa bibliografía, siendo Zadeh (1965) el primero en enunciarlos.

En el campo de la ingeniería de recursos hidráulicos la LD se emplea, por ejemplo, como sustituta de las técnicas de regresión para inferir reglas de operación óptimas de embalses (Mousavi 2007), o para determinar las sueltas de un embalse con generación de energía hidroeléctrica en función de las entradas y el estado del embalse (Moeini 2011).

Se ha dejado para el final la técnica de optimización en la que se va a centrar el desarrollo de esta tesina de máster. Las redes de flujo son una técnica, menos actual que algunas de las descritas anteriormente dado que sus orígenes datan de los años 60 (Ford y Fulkerson 1962), pero utilizada habitualmente para la optimización de sistemas de recursos hídricos (Sabet 1991 y 1992, Kuczera 1993, Sun 1995, Khaliqzaman 1997, Hsu 2002).

La optimización de redes flujo es una forma de programación lineal que aprovecha la particular distribución de los sistemas de recursos hídricos para emplear algoritmos de optimización muy eficientes. Generalmente, la función objetivo trata de maximizar el flujo o minimizar el coste del mismo a través de la red. Para la resolución de la red de flujo se emplean algoritmos como Out-of-Kilter (Ford y Fulkerson 1962, Bazaraa 1993), Relax-IV (Bersetkas 1994), o Simplex (Ahuja 1993). Al igual que ocurre con la programación lineal, la resolución de una red de flujo exige que las relaciones entre los diferentes elementos del sistema sean lineales. Esto resulta un problema, dado que una gran cantidad de los procesos y relaciones que ocurren en un sistema de recursos hídricos son no lineales, como por ejemplo la evaporación, que depende del volumen embalsado, o los retornos de las demandas, que son proporcionales al volumen suministrado en cada paso de tiempo. Aún así, varios autores (Fredericks 1998) han demostrado que estos aspectos pueden solventarse mediante la resolución iterativa de la red de flujo puramente lineal.

De todas formas, también se han desarrollado algoritmos que resuelven redes con un aspecto más general, en las cuales se permite incluir pérdidas, o ganancias, en arcos y nudos. Resolver este tipo de redes normalmente requiere un mayor esfuerzo computacional aunque un menor número de pasadas, en comparación con un algoritmo de resolución de redes puras, lo que los hace, generalmente, más rápidos (Sun 1995, Hsu 2002).

Las redes de flujo se han empleado de forma extensiva en la optimización de sistemas de recursos hídricos. Ejemplo de ello es la existencia de herramientas como HEC-PRM (Davis 1991), OPTIGES (Andreu 1992) o MODSIM (Labadie 2000) que permiten la creación esquemática de un sistema y la obtención del óptimo funcionamiento del mismo.

En definitiva, existen pocas áreas del conocimiento en las que, históricamente, se hayan empleado modelos de optimización de forma tan variada como en la optimización de sistemas de recursos hídricos (Labadie, 2004). Así, citando a Andreu (1993): *Así, si somos capaces de encontrar una función objetivo adecuada, las técnicas de optimización pueden proporcionar un marco adecuado para el análisis del sistema en el que ha de efectuarse la toma de decisiones. Este punto –el encontrar una función objetivo– no es en absoluto fácil para algún tipo de problemas, por ejemplo en temas*

relacionados con planificación en recursos hidráulicos. Tampoco es fácil representar de una forma completa las complejidades de los sistemas a optimizar. Por tanto, y aunque se hable en términos tales como “óptimo global”, en la mayor parte de los casos reales los resultados de la optimización han de contemplarse como aproximaciones y no como soluciones exactas. De esta forma, la optimización ha de entenderse como una herramienta del análisis más que como un proceso que nos ha de dar la solución definitiva. Será necesaria una buena dosis de buen juicio en la formulación de los problemas pues se ha de sopesar la necesidad de una representación suficientemente realista del sistema frente a la de que el modelo de optimización resultante sea tratable. Todo esto obliga a que el que quiera utilizar estas técnicas con éxito aprenda a: 1) Distinguir las características esenciales del sistema que conviene mantener en la representación del mismo; y 2) Escoger las técnicas de optimización que le conducirán a modelos tratables, para lo cual ha de conocer las técnicas existentes y/o adaptarlas a nuevas situaciones.

Pese a esto, aún existe una gran diferencia entre la aplicación teórica de los métodos de optimización y su aplicación práctica en el día a día de la gestión de sistemas de recursos hídricos. Labadie (2004) apunta diversas causas entre las que se pueden remarcar las siguientes: (1) el escepticismo de muchos operadores frente a los resultados de los modelos, confiando más en su experiencia personal; (2) las limitaciones tanto computacionales (ya solventadas por lo general hoy en día), como en cuanto al detalle (o falta de él) de los modelos, hace que los resultados no sean tan adecuados como los operadores están dispuestos a aceptar; (3) los modelos de optimización son mucho más exigentes matemáticamente, lo que los hace más difíciles de comprender que los modelos de simulación; (4) muchos modelos de optimización no pueden incorporar el riesgo o la incertidumbre; (5) existe una gran cantidad de modelos entre los que elegir y, muchas veces, resulta difícil, e incluso confuso, escoger uno para cada aplicación en particular; y (6) algunos de los métodos descritos no pueden generalizarse y, por lo tanto, requerirán una formulación particular para cada caso que se desee estudiar.

La inclusión de algunos modelos de optimización generalizables, como es el caso de las redes de flujo, en sistemas de soporte a la decisión ayuda a que se “pierda el miedo” a emplear la optimización como método para determinar reglas de operación tanto en sistemas grandes como en embalses individuales. Aún así, sigue siendo necesario mejorar, más que la eficiencia de resolución, la representatividad/detalle de los modelos así como su generalización de forma que no sea necesario realizar una formulación particular para cada caso. De hecho, es necesario encontrar el equilibrio entre representatividad y generalización dado que, si la representatividad deseada es muy pormenorizada, no quedará más remedio que elaborar una formulación particular del problema resolver.

3. El problema de asignación de recursos hídricos y las redes de flujo. El modelo OPTIGES.

Como ya se ha comentado en la introducción, el problema de asignación de recursos hídricos, o “water allocation problem”, consiste en obtener los repartos de flujos en una determinada cuenca hidrográfica de forma que los diferentes usos del agua queden satisfechos de la mejor manera posible. Es una forma distinta a decir que se desea obtener una distribución óptima del agua dentro de la cuenca.

Se ha considerado que la mejor forma de mostrar el problema que se está tratando es mediante un ejemplo. En la figura 2.1 se muestra un ejemplo de sistema de recursos hídricos sencillo en el que existen un embalse, dos demandas, una urbana y otra agrícola, unidos todos entre sí por una serie de tramos de río o canales en cuyo tramo final existe un requerimiento de caudal debido a causas medioambientales.

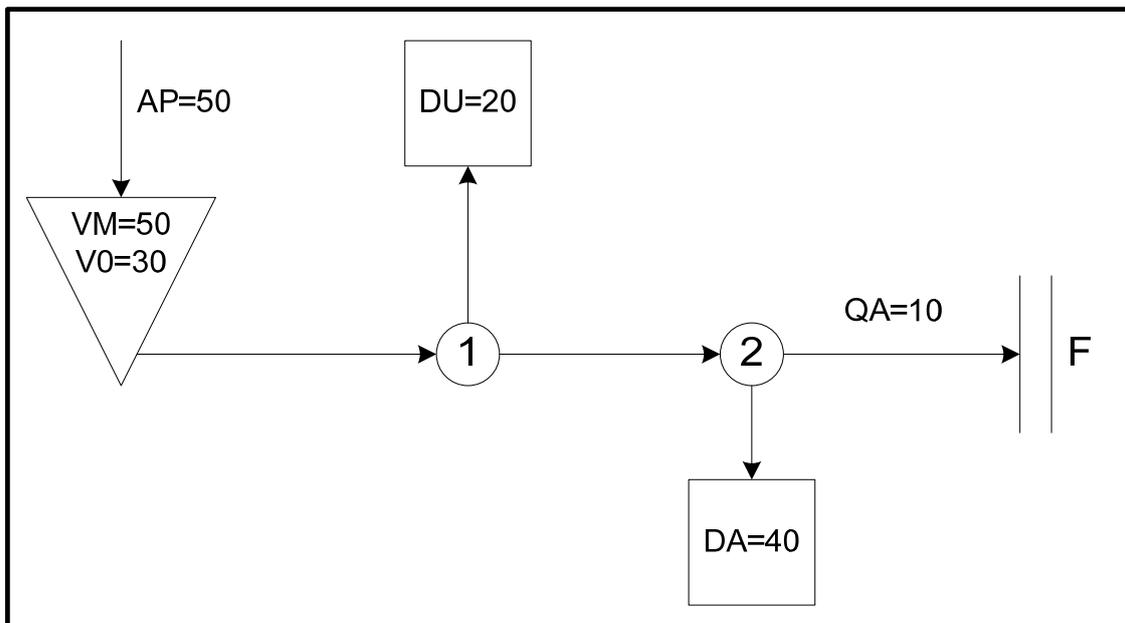


Figura 3.1 Ejemplo de sistema de recursos hídricos

Se observa en la figura que los recursos disponibles, entre aportación y volumen almacenado en el embalse a principio de mes, es de 80 unidades, mientras que la demanda de recursos por parte de los diferentes usos en la cuenca es de 80 unidades también. En este caso no existe mayor problema dado que la cantidad de recurso disponible y la cantidad demanda es la misma y no existe en la cuenca ninguna otra limitación.

Planteemos a continuación el caso en que la aportación al sistema de la figura 3.1 fuera diez unidades menor, esto es 40 unidades, sin modificar los requerimientos. Se daría la situación de no poderse suministrar agua a todos los usos y requerimientos. Es

en situaciones como en la presente que se hace necesario definir un modelo que nos permita optimizar el reparto de flujos entre todos los usos del agua en el sistema.

Por ejemplo, se podría plantear el objetivo de maximizar el suministro a las distintas demandas al tiempo que se trata de mantener el embalse lo más lleno posible de cara a futuras necesidades. Así se podría plantear la siguiente función objetivo:

$$\text{Max } a \cdot SDA + b \cdot SDU + c \cdot V$$

Donde SDA es el suministro a la demanda agrícola, SDU es el suministro a la demanda urbana y V es el volumen de agua almacenado en el embalse. Las variables a, b y c representan el beneficio que supone que una unidad de agua sea asignada a un determinado uso, y en base al valor que tome cada una de ellas se realizará un reparto del recurso u otro de forma que el valor de la función objetivo sea el máximo posible.

Las restricciones que se presentan en el sistema representado en la figura 3.1 serían:

$$V \leq 50$$
$$Q_{2-F} \geq 10$$

Que vienen a significar que el volumen almacenado no puede exceder la capacidad del embalse y que el caudal a través del último tramo debe ser, al menos, el impuesto en la restricción. La restricción de caudal ecológico podría introducirse también como parte de la función objetivo, asignándole un beneficio, pero se ha optado, en este ejemplo, plantearla como una restricción.

Por supuesto, un ejemplo tan sencillo como el expuesto tiene una resolución muy sencilla que ni siquiera requeriría la utilización de un algoritmo de resolución. No resultará tan evidente cuando se trate de esquemas mucho más complejos con más elementos y restricciones, o simplemente el periodo de cálculo se extienda durante mucho tiempo. Será frente a esos casos, en los que la solución óptima no es inmediata e incluso pueden existir múltiples posibilidades, cuando el gestor del agua deberá emplear técnicas de optimización avanzadas que le permitan llevar a cabo su análisis.

El esquema de la figura 3.1 puede representarse mediante una red de flujo compuesta por arcos y nudos como la que se muestra en la figura 3.2. Los nudos representan puntos de confluencia o divergencia del sistema, y los arcos representan las salidas de los embalses, los flujos a través de las conducciones, el almacenamiento, la evaporación, etc. Cada arco está definido por el nudo de origen, el nudo final, los límites superior e inferior del flujo que puede circular por el mismo y el coste asociado a la circulación de dicho flujo. El nudo de balance representa que la red es conservativa, al igual que el sistema, ya que en última instancia el balance de materia

debe mantenerse y, por tanto, los flujos de entrada deben coincidir con los flujos de salida.

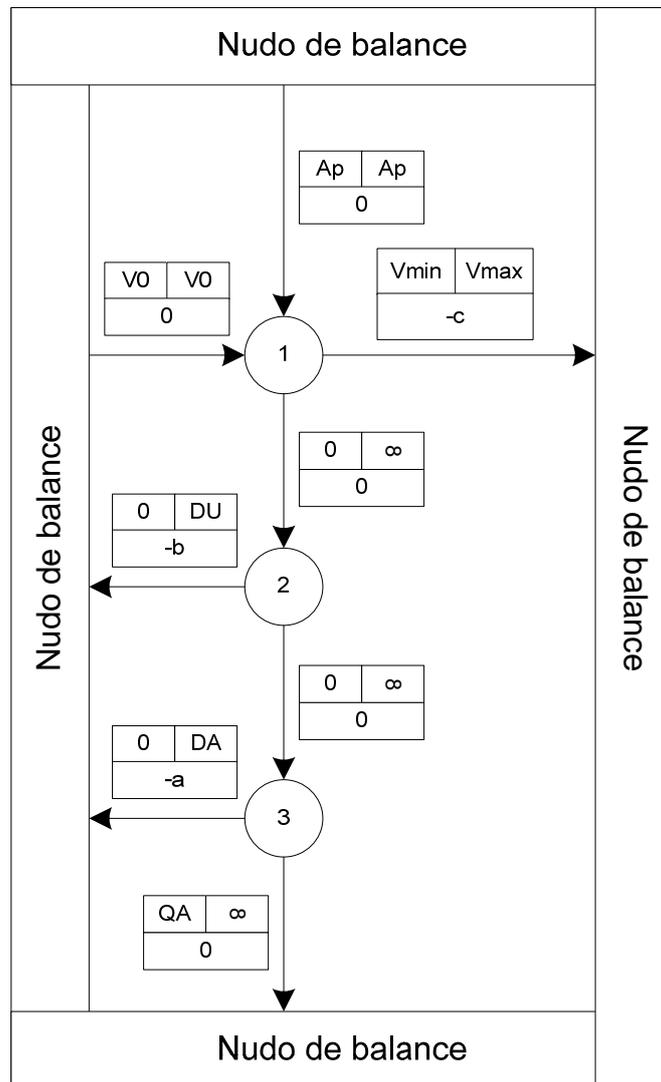


Figura 3.2. Representación del esquema de recursos hídricos en la figura 3.1 en forma de red de flujo

El empleo de la metodología de redes de flujo para la resolución de problemas como el presente resulta evidente ya que la similitud entre ellos es más que tangible. Obviamente, en casos tan sencillos como el presentado en el ejemplo no sería necesaria ni una calculadora para llevar a cabo la resolución del reparto óptimo de flujos. La dificultad de los problemas incrementa por dos causas fundamentalmente, el tamaño del sistema y el horizonte de cálculo. La figura 3.3 muestra el desarrollo del sistema representado en la figura 3.2 en forma de grafo multiperiodo cuya resolución daría como resultado el reparto óptimo de los flujos durante los n meses representados en el mismo¹.

¹ Entiéndase que el grafo mostrado en la figura 3.2 representa un periodo de optimización de un mes

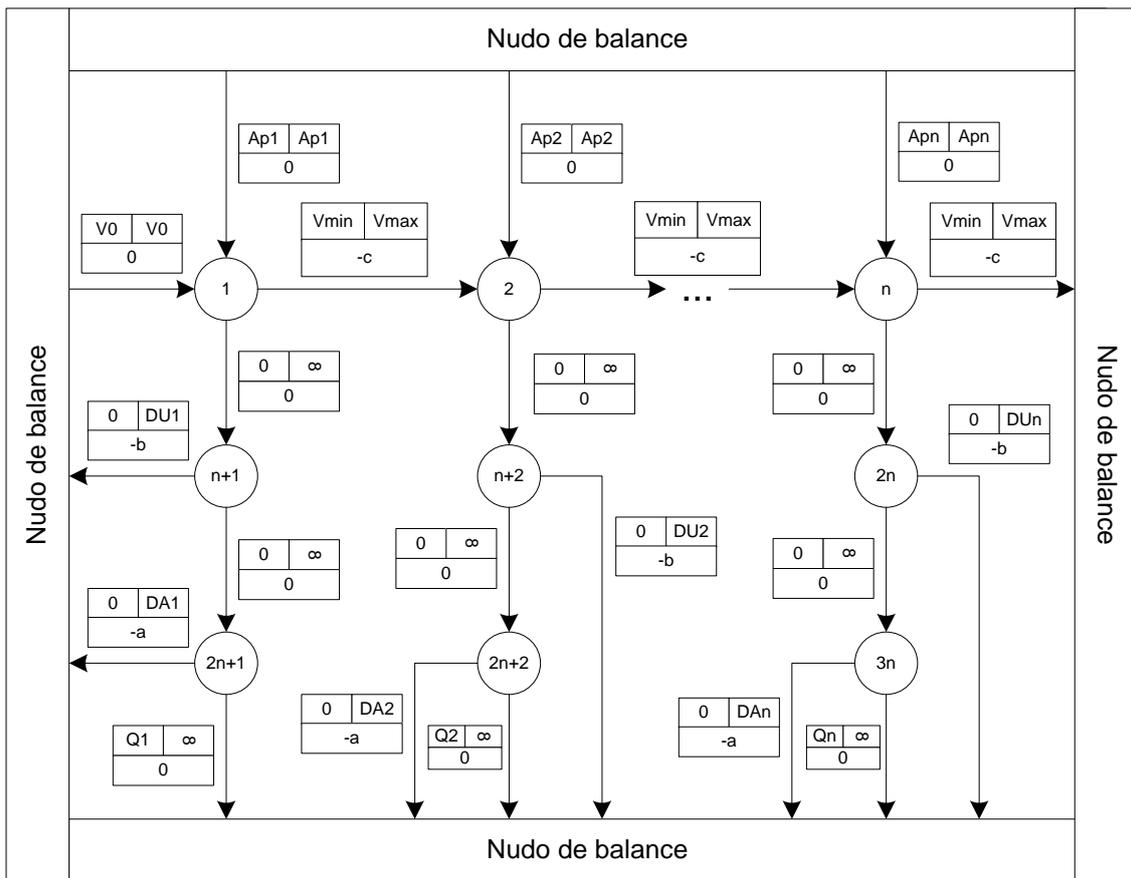


Figura 3.3. Grafo multiperiodo del sistema de recursos representado en la figura 3.1

Cuando el ejercicio de resolver la optimización de un esquema de recursos hídricos no resulte baladí y resulte necesaria la consideración de múltiples elementos durante un horizonte de cálculo considerable, será de gran ayuda contar con alguna herramienta que nos permita desarrollar el modelo del sistema que deseamos estudiar y se encargue, internamente, de generar la red de flujo, ejecutar el algoritmo que la resuelva y, finalmente, mostrarnos los resultados en un formato que nos permita trabajar posteriormente con ellos para su análisis.

Dada la gran similitud entre un esquema de un sistema de recursos hídricos y una red de flujo y la sencillez de la formulación del problema de flujo a coste mínimo, que se verá en el próximo capítulo permite emplear el método en prácticamente cualquier sistema de recursos hídricos que se desee modelar. Por estas razones se han creado muchas herramientas para la creación de modelos, tanto de simulación como de optimización, de sistemas de recursos hídricos cuyo motor de cálculo es un algoritmo de resolución de redes de flujo.

Así, dentro de los modelos de simulación, encontramos los ejemplos de MODSIM (Labadie 2000) y de SIMGES (Andreu et al. 2007), que emplean los algoritmos Relax-IV y Out-of-Kilter respectivamente para realizar el reparto de flujos a escala mensual a lo largo del sistema. Para conseguir que la simulación sea lo más fiel a la realidad, ambos

modelos incluyen la posibilidad de definir prioridades entre los diferentes usos del agua, así como reglas de operación de embalses, siendo el segundo de ellos el que más desarrollado tiene este segundo aspecto. Si bien gracias a los aspectos comentados, los resultados de ambos modelos responden a una simulación del sistema, éstos no dejan de ser modelos de optimización a escala mensual ya que todos los algoritmos de resolución de redes de flujo terminan arrojando un vector de flujos que es el óptimo para la red planteada.

Respecto a los modelos de optimización propiamente dichos, u optimización multiperiodo dado que se optimizan periodos superiores al mes, que emplean algoritmos de resolución de redes de flujo, se tienen los modelos HEC-PRM (Davis 1991) y OPTIGES (Andreu 1992). El primero de ellos emplea una implementación del algoritmo de resolución de redes de flujo generalizadas enunciado por Jensen, mientras que el segundo utiliza el algoritmo Out-of-Kilter para redes de flujo puras.

Dado que para el desarrollo de los trabajos descritos en esta tesina se va a emplear como base el modelo OPTIGES, se incluye una descripción completa de él en el apéndice 1 de este texto.

4. Análisis de algoritmos de resolución de redes de flujo para la optimización de esquemas de recursos hídricos.

Las redes de flujo son una herramienta de amplia aplicación en numerosos aspectos de la ciencia y la ingeniería. La similitud, esquemática, de una gran variedad de sistemas, como pueden ser las redes de telecomunicaciones, las redes eléctricas o los mismos sistemas de recursos hídricos, con la propia definición de las redes de flujo ayuda a que se opte por estos modelos matemáticos a la hora de resolver los problemas asociados al óptimo funcionamiento de los sistemas de estudio.

La utilización de redes de flujo para obtener el funcionamiento óptimo de un sistema tiene las mismas ventajas que las de la programación lineal, por ser las redes de flujo una configuración especial de ésta. Estas ventajas, ya comentadas en el anterior capítulo son: (1) la flexibilidad de ésta técnica para ser empleada eficientemente en problemas con un tamaño considerable; (2) la convergencia a un óptimo global; (3) no requerir una solución inicial por parte del usuario; y (4) el desarrollo de una teoría dual efectiva para el análisis de sensibilidad. A éstas han de añadirse las específicas asociadas a la especial configuración de una red de flujo como es su estructura fácilmente representable en matrices, lo que permite una manipulación muy eficiente de la información contenida en las mismas.

Por supuesto, esta metodología no está exenta de ciertos problemas, siendo el mayor de ellos la dificultad, si no imposibilidad, de representar aspectos no lineales, más habituales en la realidad que los lineales. Aún así, estas no-linealidades pueden solventarse, en cierto modo, mediante aproximaciones e iteraciones.

Desde encontrar el camino más corto, hasta cuál es el máximo flujo que puede circular por una red, los problemas que se pueden resolver mediante una red de flujo, con el algoritmo apropiado a cada caso, son muchos y variados (Ahuja, 1993 y Bazaraa, 1977). Muchos de estos problemas son casos especiales del problema de flujo a coste mínimo (MCNFP, "Minimum Cost Network Flow Problem", en la literatura en inglés). Este problema puede definirse, matemáticamente, de la siguiente manera (Ahuja, 1993):

Sea un grafo dirigido $G = (N, A)$ consistente en un conjunto N de nodos y un conjunto A de m arcos dirigidos. Cada arco $(i, j) \in A$ tiene un coste asociado c_{ij} que denota el coste por unidad de flujo en dicho arco. Además, asociamos a cada arco $(i, j) \in A$ una

capacidad u_{ij} , que representa el máximo flujo que puede atravesar ese arco, y un límite inferior l_{ij} , que represente el mínimo flujo que debe atravesar el arco. También asociamos a cada nudo $i \in N$ un número entero b_i representando su suministro/demanda. Si $b_i > 0$, el nudo i es un nudo de suministro; si $b_i < 0$, el nudo i es un nudo de demanda con una demanda $-b_i$; y si $b_i = 0$, entonces el nudo i es un nudo de transferencia. Las variables de decisión en el problema de flujo a coste mínimo son los flujos en los arcos y representamos el flujo en cada arco $(i, j) \in A$ como x_{ij} . El problema de flujo a coste mínimo es un modelo de optimización formulado como sigue:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij} \quad (4.1)$$

$$\text{s.a.} \sum_{j=1}^m x_{ij} - \sum_{k=1}^m x_{ki} = b_i \quad i = 1, \dots, m \quad (4.2)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad i, j = 1, \dots, m \quad (4.3)$$

Según Andreu (1992): *Resulta evidente que los sistemas de recursos hídricos, de una forma esquemática, son asimilables a una red de flujo (especialmente en el caso de sistemas de aguas superficiales), pues hay en ellos una serie de cauces y canales (arcos) que unen una serie de puntos (nodos) como son los embalses, las tomas, los puntos de conjunción de afluentes, etc., y en los que el agua circula siempre en un sentido predeterminado. Por lo tanto, es lógico plantear la optimización de un sistema de recursos hídricos mediante la resolución de un problema de flujo a coste mínimo.*

En el siguiente apartado se presentarán algunos de los algoritmos que más se han utilizado en los últimos tiempos para la resolución de redes de flujo orientadas a la optimización de sistemas de recursos hídricos, resolviendo el problema de flujo a coste mínimo asociado a las mismas. Además, se ha estudiado, también, las diferencias documentadas de funcionamiento de unos y otros, aspecto que se expondrá posteriormente.

Algunos de estos algoritmos son los que, actualmente, se encuentran implementados en varios Sistemas de Soporte a la Decisión (Andreu, 1996; y Labadie, 2000), de uso habitual en estudios de análisis de sistemas de recursos hídricos.

4.1. Algoritmos de optimización de redes de flujo

La optimización de una red de flujo conlleva, principalmente, el reparto de flujos a través de la misma de forma que se minimice el valor de una función objetivo que, generalmente, tendrá la forma de la ecuación 1, además de cumplirse las restricciones 2 y 3 en todos los nudos y conducciones respectivamente. Esto no es algo que pueda

llevarse a cabo de forma analítica y habrá de recurrirse a algún, o algunos, algoritmos para resolver el problema de forma numérica (Bersetkas, 1998).

Pese a que la red de flujo podría resolverse mediante algún algoritmo general de programación lineal o no-lineal, resulta más ventajoso aprovecharse de la particular estructura de la red de flujo para acelerar la convergencia a la solución mediante la adaptación de un algoritmo general o la utilización de un algoritmo específico para redes de flujo.

Bersetkas (1998) divide los algoritmos para optimización de redes de flujo en 3 categorías: (1) Mejora del coste primal; (2) mejora del coste dual; y (3) subasta. La primera categoría se corresponde con los algoritmos que resuelven el problema de flujo a coste mínimo a partir de una solución factible inicial y que generan una secuencia de vectores de flujo factibles, cada uno con un coste mejor que el anterior, hasta alcanzar el óptimo. Los algoritmos pertenecientes a la segunda categoría se basan en la optimización de un problema relacionado con el original llamado problema dual, cuyas variables toman el nombre de precios. Posteriormente se trata de alcanzar el mejor coste dual mediante la construcción sucesiva de vectores de precios. Por último, los algoritmos del tipo subasta resuelven la red de flujo mediante un procedimiento que recuerda, en cierta manera, a las subastas reales. Aunque pueden considerarse aproximadamente como procesos de optimización dual, en realidad las iteraciones tienen en cuenta tanto los precios (dual), como los flujos (primal), llegando a poder empeorar ambos en una sola iteración, aunque finalmente se alcance una solución primal óptima.

Los algoritmos seleccionados en este estudio forman una muestra de las familias de algoritmos presentadas en el párrafo anterior.

4.1.1. *Out-of-Kilter*

Formulado por Ford y Fulkerson (1962), el algoritmo Out-of-Kilter es/ha sido uno de los algoritmos más utilizados en la optimización de redes de flujo conservativas. Además, resulta un algoritmo de exposición común en textos generales sobre redes de flujo debido a su sencillez de exposición (Bazaraa, 1977; Ahuja, 1993).

El problema específico que resuelve este problema es:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij} \quad (4.4)$$

$$\text{s.a.} \sum_{j=1}^m x_{ij} - \sum_{k=1}^m x_{ki} = 0 \quad i = 1, \dots, m \quad (4.5)$$

$$l_{ij} \leq x_{ij} \leq u_{ij} \quad i, j = 1, \dots, m \quad (4.6)$$

Obsérvese que, a diferencia con el problema formulado en las ecuaciones (3.1) a (3.3), este problema de coste mínimo exige que todos los nudos del mismo sean de transferencia. Además, se impone que flujo en los arcos se mantenga dentro de unos límites inferior y superior donde $l_{ij}, u_{ij} \geq 0$.

Este algoritmo, perteneciente a la segunda familia de algoritmos, basa el mecanismo de resolución de la red de flujo en la resolución sucesiva e iterativa de los problemas primal y dual. La estrategia de resolución incluye la comprobación del estado de “sincronización” (In-Kilter) o “desincronización” (Out-of-Kilter) de cada arco de la red, y el intento de asignar el flujo de forma que todos los arcos se encuentren “sincronizados” (In-Kilter).

A modo de resumen, el esquema general de resolución del algoritmo Out-of-Kilter es el que sigue (Bazaraa, 1977):

- (1) Comenzar con un flujo conservativo y una solución factible para el problema dual. Se identifican los estados de “sincronización” y se calculan los números de “sincronización”.
- (2) Si la red tiene un arco “desincronizado” (Out-of-Kilter), se lleva a cabo una fase primal del algoritmo. Durante esta fase se selecciona un arco “desincornizado” (Out-of-Kilter) y se intenta construir una nueva red de flujo conservativa de forma que no se empeore el número de “sincronización” de ningún arco y se mejore el del arco seleccionado.
- (3) Cuando ya no se puede mejorar ningún flujo en la fase primal, el algoritmo construye una solución dual de forma que no se empeore ningún número de “sincronización” y se repite el paso (2).

Iterando los pasos (2) y (3), el algoritmo termina construyendo una solución óptima o determinando que no existe ninguna solución factible.

Las principales ventajas de este algoritmo pueden encontrarse en Jensen (1987):

- No requiere ninguna estructura de memoria especial para la representación de la red. Los parámetros se introducen y almacenan en listas de orden arbitrario
- No utiliza parámetros externos. Todo se describe en los parámetros de los arcos.
- El algoritmo puede inicializarse con cualquier conjunto de flujos que satisfaga la conservación de flujo. Por ello, es especialmente útil para realizar análisis de sensibilidad cuando se varían los parámetros de los arcos.

Por supuesto, el algoritmo tiene sus desventajas:

- El empleo de arcos para especificar flujos en los nudos a menudo supone un alto requerimiento de memoria
- Las soluciones no son necesariamente básicas. Esto puede resultar en una convergencia lenta hacia el óptimo.
- El procedimiento de resolución puede requerir numerosas lecturas de la lista de arcos, por lo que no es demasiado eficiente, computacionalmente, para problemas grandes.

4.1.2. Relax-IV

Este algoritmo, presentado por Bersekas (1994), une el algoritmo RELAX (Bersekas, 1988) con un método de inicialización basado en un algoritmo de subasta que puede elegirse utilizar, o no. El problema que se resuelve es el siguiente:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij} \quad (4.7)$$

$$\text{s.a.} \sum_{j=1}^m x_{ij} - \sum_{k=1}^m x_{ki} = b_i \quad i = 1, \dots, m \quad (4.8)$$

$$0 \leq x_{ij} \leq u_{ij} \quad i, j = 1, \dots, m \quad (4.9)$$

Este problema es resultado de realizar ciertas operaciones que permitirán un ahorro de memoria de almacenamiento respecto al algoritmo Out-of-Kilter. El valor de l_{ij} se sustituye por cero y, a cambio, se emplea el vector $b(i)$, de menor tamaño. Para alcanzar esta formulación basta realizar el cambio de variables $x_{ij} = x_{ij} - l_{ij}$ en el problema enunciado en las ecuaciones (3.4) a (3.6), obteniéndose el mostrado encima de este párrafo.

Al igual que el algoritmo Out-of-Kilter, Relax-IV es un algoritmo perteneciente a la segunda familia, cuya estrategia de resolución de la red de flujo consiste en resolver de forma iterativa y alternativa la optimización de los problemas primal y dual. En el caso de este algoritmo no se habla de arcos sincronizados y desincronizados. El enfoque que se plantea en este caso se basa en determinar si un arco se encuentra activo, equilibrado o inactivo mediante la comparación de la diferencia de los precios (dual) asociados a cada uno de los nudos en los extremos de cada arco con el coste (primal) del flujo a través de este. Según el estado de "actividad" de cada arco, se definen una serie de condiciones de óptimo de forma que una solución primal-dual (x, p) será óptima sí y solo sí, se cumplen las siguientes condiciones en todos los arcos de la red simultáneamente (Bersekas, 1988):

$$x_{ij} = l_{ij} \quad \forall (i, j) / t_{ij} < c_{ij} \text{ (el arco está inactivo)} \quad (4.10)$$

$$l_{ij} \leq x_{ij} \leq u_{ij} \quad \forall (i, j) / t_{ij} = c_{ij} \text{ (el arco está equilibrado)} \quad (4.11)$$

$$x_{ij} = u_{ij} \quad \forall (i, j) / t_{ij} > c_{ij} \text{ (el arco está activo)} \quad (4.12)$$

$$d_i = 0 \quad \forall i \in N \text{ (el déficit es cero en todos los nudos)} \quad (4.13)$$

siendo:

$$t_{ij} = p_i - p_j \quad \forall (i, j) \in A \text{ (vector tensión)} \quad (4.14)$$

La forma de alcanzar estas condiciones consiste en incrementar de forma iterativa el funcional dual. El vector de precios se incrementa mientras se mantienen las condiciones anteriores para el vector de flujo. El algoritmo finaliza cuando el déficit en cada nudo es cero. La forma de llevar a cabo los incrementos en el vector de precios consiste en, comenzando desde un solo nudo con déficit diferente a cero, comprobar si puede mejorarse la función dual si se incrementa su precio. Si no es posible, se construye gradualmente, según un proceso de etiquetado, bien un camino incremental de flujo o un conjunto asociado con una dirección de ascenso. La principal característica es que el proceso de etiquetado se detiene en cuanto se encuentra la primera dirección de ascenso, en vez de hacerlo para todos los nudos. A este proceso se le llama método de relajación.

Además de emplear este proceso de resolución, el algoritmo Relax-IV incluye la posibilidad de ser inicializado de dos formas distintas. La primera es similar a la de otros métodos duales, como el Out-of-Kilter, mediante cualquier conjunto de flujos que satisfaga la conservación de flujo, generalmente un vector de ceros lo hará. La segunda se corresponde con la ejecución de un algoritmo de subasta inicial para determinar un buen conjunto de flujos y precios iniciales, para una resolución más eficiente de problemas grandes, para los cuales el algoritmo RELAX sólo resultaba poco eficiente.

Al tratarse de un algoritmo similar, en esencia, al algoritmo Out-of-Kilter, las ventajas de Relax-IV son similares, aunque no iguales, a las del anterior:

- No requiere ninguna estructura de memoria especial para la representación de la red. Los parámetros se introducen y almacenan en listas de orden arbitrario
- El algoritmo puede inicializarse con cualquier conjunto de flujos que satisfaga la conservación de flujo. Por ello, el algoritmo es especialmente útil para realizar análisis de sensibilidad cuando se varían los parámetros de los arcos.

- Al no realizar lecturas exhaustivas de toda la lista de arcos y detenerse, normalmente, en el primero que cumple las condiciones de ascenso, la resolución de la red es más rápida.

Por supuesto, el algoritmo tiene sus desventajas:

- El procedimiento de resolución sin la inicialización por subasta se encuentra con dificultades para la resolución de problemas grandes. Aunque se aprecia una gran mejoría si se utiliza la inicialización.

4.1.3. NETFLO (SIMPLEX)

El método simplex para resolver problemas de programación lineal es un algoritmo muy poderoso para resolver problemas de optimización con restricciones. Dado que las redes de flujo suponen un tipo especial de programación lineal, se podría esperar que el método simplex fuese una alternativa atractiva para la resolución de las mismas. Sin embargo, el método general no resulta competitivo frente a otros algoritmos especialmente preparados para la resolución de redes de flujo aprovechando su particular estructura (Ahuja 1993).

NETFLO es el nombre dado a la implementación del algoritmo simplex para redes de flujo realizada por Kennington y Helgason (1980). Se trata de un algoritmo de la primera familia, que se basa en el incremento sucesivo del vector de flujo hasta que se alcanza un óptimo en la función objetivo.

El problema que se resuelve es el enunciado para el problema del flujo a coste mínimo en las ecuaciones (4.1) a (4.3).

Como ya se ha comentado previamente, NETFLO lleva a cabo la optimización de la red de flujo mediante el algoritmo simplex para redes de flujo que aprovecha la estructura especial de la red para adaptar el método simplex general. Este algoritmo se basa en la obtención de un tipo de soluciones llamadas “árboles de cobertura” (spanning trees). En estas soluciones se fija el flujo de los arcos que no pertenecen al “árbol de cobertura” bien a cero o al límite de su capacidad. El valor óptimo se alcanza avanzando de una solución a otra generando, en cada paso de cálculo, un árbol factible con su vector de flujos correspondiente. El coste de cada vector de flujos nunca ha de ser menor que en el paso anterior hasta que se alcanza el óptimo. Cada iteración, llamada pivote como en el algoritmo SIMPLEX de la programación lineal, opera de la siguiente forma Bersetkas (1998):

- (a) Se añade un nuevo arco al árbol de forma que se cree un único ciclo con coste negativo. El arco entrante se suele seleccionar en base al coste reducido asociado al mismo.

- (b) Se asigna al ciclo tanto flujo como sea posible sin violar la factibilidad del mismo.
- (c) Se descarta uno de los arcos del ciclo, lo que genera un nuevo árbol para ser utilizado en la nueva iteración. El arco descartado se elige de entre aquellos arcos del ciclo que aporta un menor incremento de flujo a través del mismo.

4.1.4. Generalized Network Algorithm (EMNET y NETPD)

El algoritmo que se analiza a continuación constituye la solución a un tipo de red de flujo distinta a las vistas hasta ahora. Una red de flujo con ganancias/pérdidas se trata de una red de flujo que, además de los parámetros habituales asociados a una red de flujo normal, tiene asociado un término multiplicador $\mu_{ij} > 0$ en cada arco (i, j) . De esta forma, el problema a resolver resulta (Jensen 1987):

$$\text{Min} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij} \quad (4.15)$$

$$\text{s.a.} \sum_{j=1}^m x_{ij} - \sum_{k=1}^m \mu_{ij} x_{ki} = b_i \quad i = 1, \dots, m \quad (4.16)$$

$$0 \leq x_{ij} \leq u_{ij} \quad i, j = 1, \dots, m \quad (4.17)$$

Se asume que el multiplicador μ_{ij} es un número racional que puede expresarse como $\mu_{ij} = p_{ij}/q_{ij}$, para p_{ij} y q_{ij} dos números enteros. Cuando enviamos 1 unidad de flujo a través del arco (i, j) , al nudo j llegan μ_{ij} unidades. Si $\mu_{ij} < 1$, el arco es perdedor; y si $\mu_{ij} > 1$, el arco es ganador.

Nótese que se asume que la capacidad de arco u_{ij} es un límite superior del flujo que se envía desde el nudo i , no del flujo disponible en el nudo j . De forma similar, c_{ij} es el coste por unidad de flujo que enviamos desde el nudo i , y no el coste por unidad de flujo que llega al nudo j . Los flujos mínimos están resueltos de la misma manera que en la formulación del problema para el algoritmo Relax-IV.

La resolución de esta red de flujo puede realizarse de forma similar a la resolución de los anteriores problemas adaptando los algoritmos. Ahuja (1993) y Jensen (1987) desarrollaron adaptaciones de algoritmos de tipo primal (simplex) para resolver el problema de flujo a coste mínimo en redes de flujo generalizadas.

EMNET (McBride, 1985), es el nombre de la implementación de un algoritmo tipo simplex (familia 1) para resolver una red de flujo generalizada. La estrategia general del algoritmo se divide en tres fases: En la fase inicial (0), se resuelve una red de flujo pura, quitando los aspectos complicados, lo que permite obtener una solución aproximada de una forma rápida y eficaz; en la siguiente fase (1) se añaden los

aspectos complicados de la red y se obtiene una solución factible a partir de la obtenida en la fase 0; por último, la fase (2) consiste en variar los flujos, como en el algoritmo simplex, hasta alcanzar el óptimo.

NETPD (Curet, 1994), es una implementación de un algoritmo de tipo primal-dual (familia 2) para redes de flujo generalizadas. El procedimiento de resolución de la red de flujo de este algoritmo es similar al expuesto en los algoritmos Out-of-Kilter y Relax-IV. De hecho, se realiza una mezcla de ambos procedimientos, se mantiene el incremento de la factibilidad de las soluciones durante la fase primal, como en Out-of-Kilter, pero se reduce la cantidad de trabajo necesaria para determinar qué variable dual debe incrementarse, como en Relax-IV.

Un aspecto interesante de los algoritmos para redes generalizadas es la posibilidad de resolver, también, redes de flujo puras de forma eficiente sin necesidad de realizar ningún tipo de cambio ni en códigos ni en la introducción de los datos.

4.1.5. Otros algoritmos

Aparte de los tratados, existen otros tantos algoritmos que permiten optimizar redes de flujo, aunque se ha optado por no mostrarlos en detalle debido a que no aportan un valor añadido a la exposición, bien por ser menos comunes en la bibliografía, o por ser implementaciones similares a las realizadas por alguno de los algoritmos mostrados. Ejemplos de estos algoritmos son:

- RNET (Grigoriadis y Hsu, 1978) es una implementación del algoritmo simplex para redes de flujo anterior a NETFLO aunque, básicamente, tienen los mismos principios.
- NEPSA (Paparrizos, 2009), es el nombre de un algoritmo en desarrollo, basado en una modificación del método simplex para redes de flujo, que aún no ha sido implementado y cuyo funcionamiento frente a otros algoritmos más desarrollados está aún por comprobar.

4.2. Comparación según la bibliografía

Para no perdernos dentro del espeso bosque que supone la existencia de tal cantidad de algoritmos orientados a realizar un trabajo similar, y con la firme intención de enfocar los esfuerzos de la investigación únicamente sobre los más adecuados, se ha resuelto realizar una primera estimación de la eficacia de los diferentes algoritmos en problemas reales de optimización de los recursos hídricos mediante la consulta de parte de la bibliografía existente al respecto para obtener una primera impresión del funcionamiento de los diferentes algoritmos presentados.

Una ventaja remarcable de todos los artículos consultados es la utilización, en la mayoría de ellos, de un generador aleatorio de problemas de redes de flujo común, NETGEN (Klingman, 1974), lo que, en cierta medida, asegura cierta similitud en los problemas resueltos por unos y otros.

Una buena parte de los autores que tratan en sus artículos el funcionamiento de unos y otros algoritmos (Bersetkas, 1985, 1988 y 1994; Rani, 2010; y Kuczera, 1993), coinciden en que los códigos basados en el método de relajación (RELAX-IV e implementaciones anteriores), generalmente, funcionan de manera mucho más eficiente que el resto de algoritmos similares implementados hasta la fecha (Out-of-Kilter y Simplex), siendo, aproximadamente, alrededor de un orden de magnitud más rápidos.

De especial interés son los resultados aportados en (Kuczera, 1993), donde se realiza una comparación entre los tiempos de ejecución de los algoritmos NETFLO (simplex) y RELAX (primal-dual) para la resolución de una red de distribución de agua en superficie, con embalses y demandas. En este caso, se concluye que RELAX llega a ser entre, aproximadamente, dos y siete veces más rápido en la resolución de la red que NETFLO. Además, se muestra, en ese mismo artículo, que la información con la que se inicializa la resolución de RELAX afecta de forma bastante importante al tiempo de ejecución de éste.

No se ha encontrado ningún artículo en que se realizara una comparación explícita entre los algoritmos Out-of-Kilter y NETFLO. Aún así, en (Bersetkas, 1985) ya se comprueba el bajo rendimiento del Out-of-Kilter respecto a una de las primeras versiones de RELAX y de RNET (que implementa el método simplex al igual que NETFLO), lo que nos ayudaría a concluir que el algoritmo que Ford y Fulkerson crearon en 1962 se ha quedado, relativamente, anticuado.

Cabe comentar que según (Curet, 1998), el código RELAX es el método que más rápido resuelve los problemas de NETGEN.

Existen ciertas excepciones, como el caso de Paparrizos (2009), que aclama al método simplex como la mejor opción para resolver MCNFP, aunque no se aporta ninguna prueba al respecto.

Por otro lado se encuentran los algoritmos dedicado a la resolución de redes de flujo generalizadas.

En (Sun, 1995) se realiza una comparación entre EMNET y MINOS, un software de optimización lineal y no lineal con diversos algoritmos, en la resolución de una serie de problemas tipo que representan esquemas de optimización de sistemas de recursos hídricos a largo plazo de acuerdo con los objetivos de planeamiento del Metropolitan

Water District of Southern California (MWD). Aunque no especifica el tipo de optimización que se emplea con MINOS, en (Labadie, 2004) se comenta que es un algoritmo de programación lineal de tipo simplex, el cual resulta entre 11 y 117 veces más lento que EMNET en la resolución de la red. McBride (1985) también muestra que EMNET resulta alrededor de 5 veces más rápido que MINOS.

Se observa (Curet, 1994 y 1998) también que, al igual que para redes de flujo puras, los algoritmos del tipo primal-dual (NETPD) para redes de flujo generalizadas son, por lo general, más eficientes que los algoritmos de tipo simplex (EMNET).

Se ha comentado anteriormente que los algoritmos de optimización de redes de flujo generalizadas pueden, perfectamente, resolver redes de flujo puras. A este respecto, en (Curet, 1997 y 1998), se muestra que la resolución de una red de flujo pura con NETPD y con RELAX lleva, aproximadamente, el mismo tiempo de computación, siendo ambos dos algoritmos del tipo primal-dual. Por otro lado, comparado con un algoritmo de tipo simplex (NETFLO), se muestra como NETPD es capaz de resolver la red en mucho menos tiempo.

4.3. Limitaciones de las redes de flujo

Las redes de flujo resultan un método muy interesante para el desarrollo de modelos de optimización de sistemas de recursos hídricos. Sin embargo, su utilización no carece de desventajas. Un problema de redes de flujo, al fin y al cabo, no deja de ser un problema de programación lineal de resolución más eficiente por la característica formulación del mismo y, por tanto, adolece de los mismos problemas. El más importante de todos es la incapacidad de tratar con aspectos no lineales, lo que implica que deben realizarse simplificaciones que, en ocasiones, pueden resultar excesivas para la representatividad de los modelos desarrollados, o puede aproximarse la solución mediante iteraciones sucesivas hasta alcanzar la convergencia de los resultados (Fredericks 1998).

Se ha criticado la utilización de iteraciones en redes de flujo (Ilich 2009) por considerarse que las sucesivas iteraciones no alcanzan el resultado óptimo. Sin embargo, como se mostrará más adelante, en esta tesina se ha considerado que la aproximación de las no linealidades mediante proceso iterativo sigue siendo válida ya que lo que se hace es resolver sucesivamente una red de flujo que cambia según las condiciones de flujo resultantes de la iteración anterior, cuya solución sí es la óptima, lo que implica que la solución final, cuando se alcanza la convergencia, también debe ser óptima mientras se cumplen unas condiciones adicionales a las intrínsecas a la formulación de la red de flujo.

4.4. Consideraciones adicionales

En este tercer capítulo se ha realizado un estado del arte de algoritmos de optimización de redes de flujo y de su aplicación en la gestión/optimización de sistemas de recursos hídricos. También se han comentado los problemas que supone la utilización de las redes de flujo en la resolución de sistemas que presentan cierta dificultad de representación, o precisión, especialmente cuando se incluyen aspectos de carácter no lineal, y la forma de enfocar dicha resolución.

Teniendo en cuenta el deseo expreso de mejorar y ampliar el modelo OPTIGES, y teniendo en cuenta que lo más acertado pasa por mejorar, en primer lugar, la capacidad de cálculo, la primera consideración que se debe realizar es si el algoritmo Out-of-Kilter, empleado en la resolución del modelo actualmente, es el más adecuado para hacerlo. Por lo visto hasta el momento, aparentemente, el algoritmo se ha quedado relativamente anticuado, ya que hay algoritmos que, al menos según la bibliografía, resuelven el mismo problema de forma más eficiente y que permiten incluir más elementos. Un algoritmo más eficiente permitiría añadir mayor complejidad a los modelos y, por tanto, a la red, pero este es un aspecto que se verá posteriormente.

Ahora bien, la duda que se despierta es, desde el punto de vista de escoger un algoritmo de optimización u otro, ¿qué resulta más eficiente, tanto en velocidad de cálculo como posibilidades de representación, escoger un algoritmo que sea capaz de resolver redes de flujo puras rápidamente y solucionar la inclusión de no linealidades mediante iteraciones, o escoger uno que permita introducir más elementos en el proceso de cálculo, a costa de incrementar el tiempo de cálculo, pero reduciendo el número de iteraciones? Esta pregunta viene a colación de la existencia de dos posibilidades. La primera sería emplear alguno de los algoritmos de resolución de redes de flujo puras presentados para sustituir el que actualmente se utiliza. La segunda sería implementar un algoritmo de resolución de redes de flujo generalizadas.

En principio se va a optar por la primera opción. Por un lado, porque el modelo de optimización en que se van a basar las pruebas (OPTIGES) genera una red de flujo que se adapta casi perfectamente a dichos algoritmos y no se requerirían demasiados cambios y, por otro, porque ya se dispone de un mecanismo bien estructurado de iteraciones que tampoco habría que modificar. Por último, aunque relativamente menos importante, también resulta una razón el hecho de que, hasta la fecha, ha resultado imposible localizar un algoritmo de resolución de redes de flujo generalizadas disponible para su utilización pública, por lo que la segunda opción se dejará para investigaciones posteriores.

Para seleccionar, entonces, el algoritmo más adecuado para va a realizar una comparación de primera mano entre las diferentes posibilidades. Para ello, en el próximo capítulo, se llevará a cabo la resolución de una serie de ejemplos sencillos,

con la inclusión de ciertas particularidades en cada uno, de forma que nos permita comparar el funcionamiento de cada uno de los algoritmos y seleccionar el más adecuado.

5. Aplicación de los algoritmos de resolución de redes de flujo escogidos en la optimización de un sistema de recursos sencillo.

En el anterior capítulo se ha concluido que los algoritmos más adecuados para la resolución de las redes de flujo generadas por un modelos de optimización como podría ser OPTIGES son Out-of-Kilter, RELAX-IV y NETFLO.

Existen dos razones por las cuáles se han escogido estos algoritmos y no otros. En primer lugar por el hecho de que los dos nuevos algoritmos resuelven prácticamente el mismo problema, lo que evitaría realizar grandes cambios en el planteamiento del problema dentro del código del programa OPTIGES, modelo empleado como base para las pruebas. La segunda razón, y pese a que puede resultar una excusa, es porque pese a la multitud de algoritmos que se enuncian de forma teórica, muy pocos de ellos acaban teniendo una implementación pública, lo que dificulta enormemente su obtención.

Así, se crearon tres versiones del modelo de optimización empleando cada uno de los tres algoritmos como motor de cálculo en cada caso y sin realizar ningún otro cambio adicional. Las versiones de los tres algoritmos se obtuvieron de códigos públicos de los mismos, como ya se ha comentado.

Se realizaron algunas modificaciones a los códigos de los algoritmos para hacer coincidir nombres de variables o para calcular algunas variables adicionales en el caso de alguno de ellos. RELAX-IV y NETFLO consideran el límite inferior de los arcos siempre nulos y emplean una variable adicional para recrear los requerimientos de flujo mínimos llamada b_i . Las adaptaciones que se realizaron a ambos algoritmos consistieron simplemente en realizar la sustitución de los límites inferiores del flujo en los arcos de la red de flujo (l_{ij}) por el vector de demandas en los nudos (b_i), como se explica en los apartados correspondientes a estos algoritmos en el capítulo anterior. Esta sustitución se realiza de manera sencilla sumando los límites inferiores en diferentes términos según el nudo de procedencia de los arcos con dicho límite definido. Si bien esta sustitución plantea algunos problemas en puntos como los caudales mínimos en conducciones o volúmenes mínimos en embalses, se ha optado por no incluir estas posibilidades todavía en el código del modelo OPTIGES ya que no suponen una gran diferencia de cara a la comparación de la eficiencia de los algoritmos implementados.

Con las tres versiones del modelo compiladas se resolvieron diversos supuestos basados en el caso de estudio que se presentará en el siguiente apartado. Dichos supuestos incluyen:

- La optimización del sistema de estudio sin ningún tipo de iteración, es decir, excluyendo la evaporación de los embalses y los retornos de riego y resolviendo, por lo tanto, una red de flujo pura.
- La optimización del sistema incluyendo la evaporación y los retornos por separado.
- La optimización del sistema incluyendo evaporación y retornos a la vez.

5.1. Caso de estudio: La cuenca del río Mijares simplificada

El río Mijares se encuentra ubicado en la vertiente oriental de la península Ibérica (ver figura 4.1). La superficie total comprendida por este sistema es de 5.466 km². Con una población total en la zona de 363.578 habitantes su suministro se realiza a partir de la explotación de pozos y el aprovechamiento de manantiales. La superficie total cultivada asciende a 124.310 Has, de las cuales 43.530 Has (35 %) corresponden a regadíos, mientras que el resto (65 %) son de secano. Los cítricos constituyen el cultivo predominante, con un porcentaje próximo al 87 % de la superficie en regadío de la citada zona. La longitud del curso principal es de unos 156 Km y tienen una aportación media de la cuenca de 380 hm³/año. En cuanto a la infraestructura de almacenamiento la cuenca cuenta con tres embalses: el de mayor capacidad es el de Arenós (95 hm³ útiles), aguas abajo se encuentra el embalse de Sihar (49 hm³) y ubicado en el afluente “rambla de la Viuda” el de María Cristina (19.7 hm³).



Figura 5.1 Situación de la cuenca del río Mijares

La problemática de la cuenca se centra en el reparto del recurso entre las demandas agrícolas. En la parte baja de la cuenca se ubican los riegos denominados como “Riegos tradicionales”. Estos riegos datan de más de un milenio de antigüedad por lo que mantienen un derecho predominante sobre el resto de usos agrícolas. Por otro lado, los riegos de la parte media de la cuenca conforman los regadíos modernos, denominados también como mixtos debido a la posibilidad de utilizar tanto aguas superficiales como subterráneas. El incremento del uso de aguas subterráneas ha llevado a que el acuífero sufra problemas de intrusión marina en épocas de sequía en donde se produce una mayor explotación del acuífero. Bajo esta situación es necesario el establecimiento de una regla de gestión que proteja los derechos de los regadíos tradicionales restringiendo el uso superficial a los riegos más modernos.

Previamente a la aplicación de la metodología explicada al inicio de este capítulo se creó un modelo simplificado de la cuenca del río Mijares basado en un modelo de simulación representativo del sistema del Mijares creado para el programa SIMGES de simulación de sistemas de recursos hídricos (Andreu et al, 1996). Para ello se ha utilizado el sistema de ayuda a la Decisión AQUATOOL. Como el modelo de simulación resultaba demasiado complejo para una primera aproximación a la optimización del sistema, el modelo simplificado incluye únicamente los elementos principales de la cuenca, como son los embalses de Arenós y Sichar y las demandas agrícolas más importantes (Cota 220, Cota 100 y Riegos Tradicionales). La siguiente figura muestra la topología del modelo de simulación desarrollado para su utilización con el programa SIMGES y el modelo simplificado creado para emplear con el modelo OPTIGES.

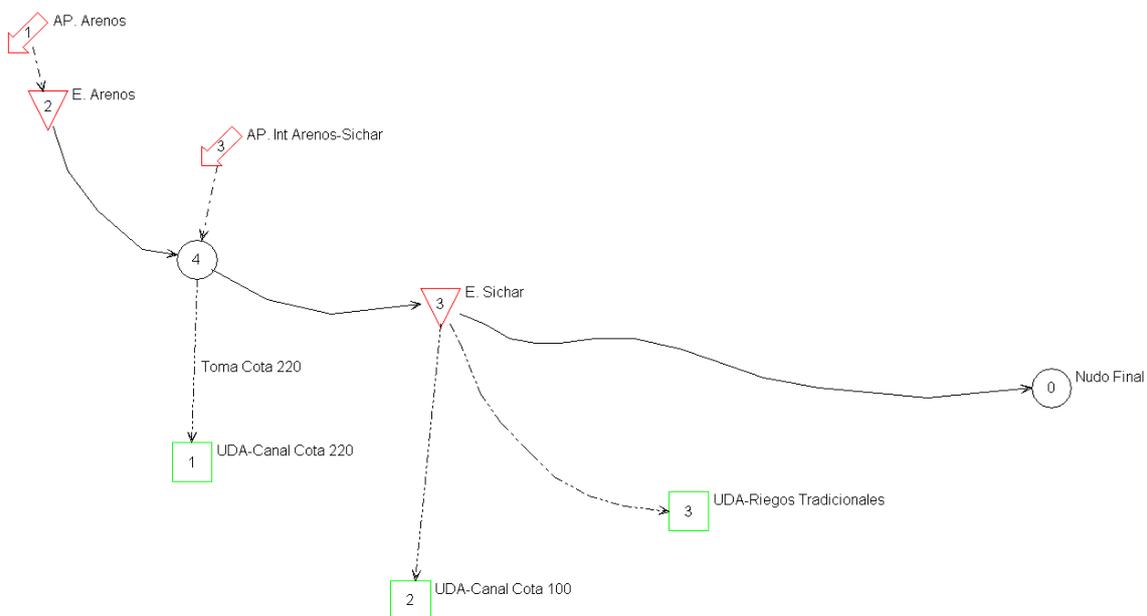


Figura 5.2. Modelo del sistema del Mijares creado con AQUATOOL para su ejecución con el programa SIMGES.

Como se puede ver en la figura el modelo de optimización consta de un curso principal que representa al río Mijares en donde se ubican los embalses de Arenós (E.Arenós) y Sichar (E. Sichar).

Las aportaciones consideradas son: el aporte de la cuenca aguas arriba del embalse de Arenós(Ap. Arenós), y el aporte de la cuenca media del río Mijares (Apo.Intermedia).

Los riegos del sistema se tienen en cuenta en el modelo con 3 elementos de demanda: “UDA-Riegos Tradicionales”; “UDA-Riegos Canal Cota-220”; y “UDA-Riegos Canal Cota 100”. No se han considerado los suministros urbanos en el modelo de optimización debido a que éstos se suplen, principalmente, desde el acuífero de la Plana de Castellón, el cual no puede incluirse, de momento, en esquemas de OPTIGES.

El orden de prioridad de las demandas es el siguiente: en primer lugar la demanda agrícola de riegos tradicionales y después las demandas de riego restantes. En cuanto a los embalses, se define el embalse de Arenós como prioritario frente al de Sichar aunque esto no tendrá efecto en el reparto de flujos salvo en el último mes del periodo de optimización considerado cada vez.

No se han tenido en cuenta en el modelo simplificado ni caudales ecológicos ni volúmenes mínimos de embalses por las razones comentadas al inicio del capítulo.

En el anexo 1 se incluye el eco de datos para poder reproducir el modelo creado con AQUATOOL.

5.2. Optimización del sistema sin iteraciones

En este apartado se llevará a cabo una optimización del modelo del Mijares simplificado creado sin tener en cuenta elementos que puedan introducir no linealidades o, lo que es lo mismo, que hagan que sea necesaria ninguna iteración. De esta forma, se puede estudiar el funcionamiento de los diferentes algoritmos considerados desde el punto de vista puramente computacional.

Se ejecutaron las diferentes versiones de OPTIGES para varios horizontes de optimización crecientes, lo que implica un tamaño de la red de flujo creciente. En la tabla 4.1 se muestra el tamaño de la red de flujo resuelta para cada horizonte de optimización². En la figura 4.3 se muestra la evolución de los tiempos de ejecución de cada uno de los algoritmos según el tamaño de red resuelta. A la figura 4.3 le acompaña la tabla 4.2 con los valores numéricos incluidos en la misma para un mayor detalle.

² En el anexo 2 se incluye la red de flujo correspondiente al periodo de optimización de 12 meses

Tamaño de la red	Número de nudos	Número de arcos
12 meses	119	317
120 meses	1091	3017
240 meses	2171	6017
360 meses	3251	9017
480 meses	4331	12017
600 meses	5411	15017
720 meses	6491	18017

Tabla 5.1 Tamaño de la red correspondiente a cada horizonte de optimización

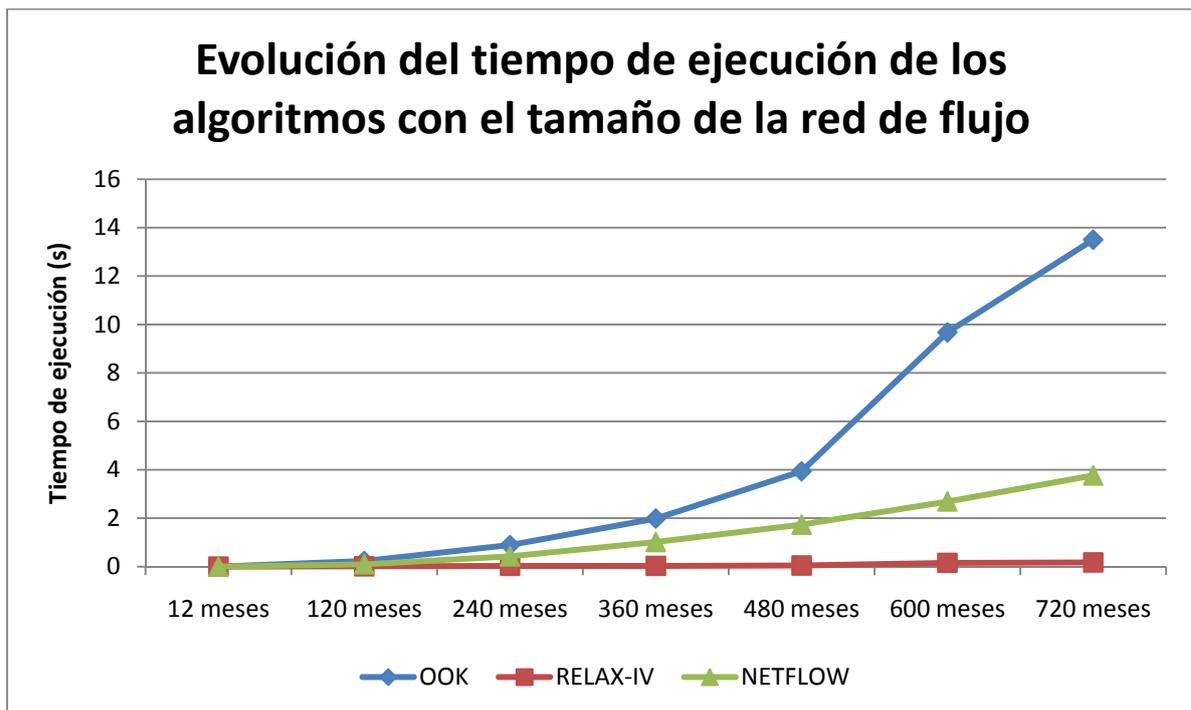


Figura 5.3. Evolución del tiempo de ejecución de los algoritmos con el tamaño de la red de flujo

Evolución del tiempo de ejecución de los algoritmos con el tamaño de la red de flujo							
	12 meses	120 meses	240 meses	360 meses	480 meses	600 meses	720 meses
OOK	0	0.234	0.891	1.984	3.938	9.672	13.5
RELAX-IV	0	0.016	0.031	0.031	0.047	0.156	0.172
NETFLOW	0	0.094	0.422	1.016	1.734	2.688	3.766

Tabla 5.2. Evolución del tiempo de ejecución de los algoritmos con el tamaño de la red de flujo.

Se puede observar como el algoritmo RELAX-IV supera notablemente en velocidad a los otros dos. En la tabla 4.3 se muestra la relación de velocidades entre ellos.

Relación del tiempo de ejecución de los algoritmos con el tamaño de la red de flujo							
	12 meses	120 meses	240 meses	360 meses	480 meses	600 meses	720 meses
OOK/RLX	0	15.00	28.50	63.50	84.00	61.90	78.55
OOK/NF	0	2.50	2.11	1.95	2.27	3.60	3.59
NF/RLX	0	6.00	13.50	32.50	37.00	17.20	21.91

Tabla 5.3. Relación entre los tiempos de ejecución de los algoritmos según el tamaño de la red de flujo.

Como indicadores de la bondad de los resultados, es decir, para comprobar que los resultados de los diferentes algoritmos son los mismos, se emplearon:

- El valor final de la función objetivo, la cual coincide siempre se emplee el algoritmo que se emplee.
- El valor del volumen embalsado, en cada embalse por separado, correspondiente al último mes del periodo de optimización, el cual, debido a que se trata del único mes en que se tiene en cuenta la prioridad de un embalse respecto a otro, debería ser el mismo para los tres algoritmos como, efectivamente, ocurre.
- El volumen embalsado total, que coincide, igualmente, para los tres algoritmos y que puede observarse en la figura 4.4.

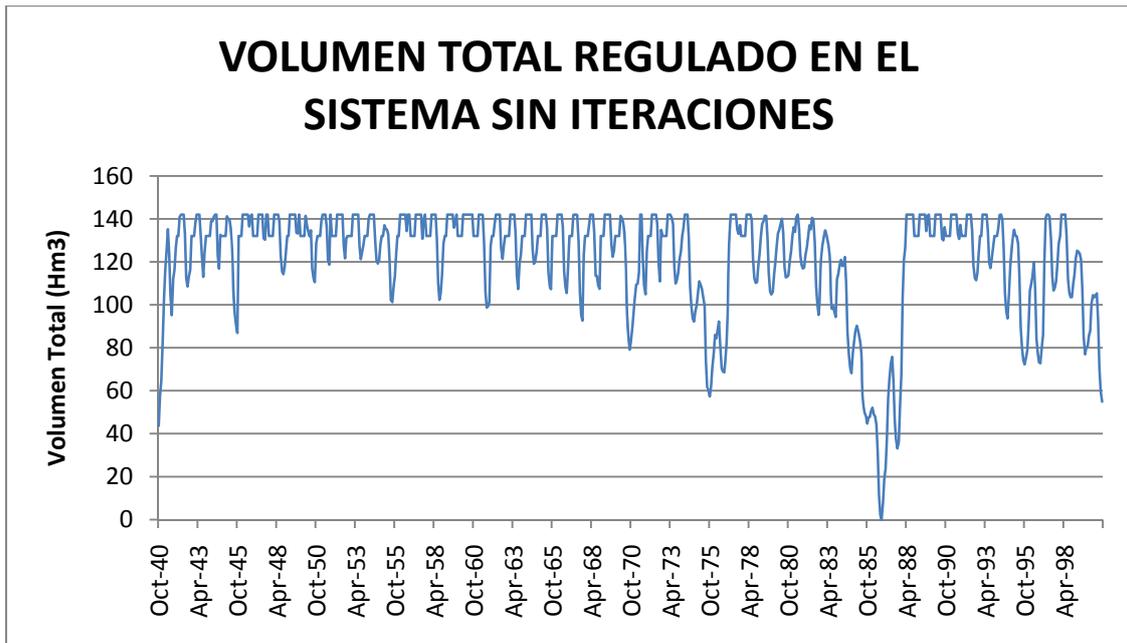


Figura 5.4. Volumen total regulado en el sistema sin iteraciones con los tres algoritmos para el periodo de optimización correspondiente a 720 meses. No se observa ninguna diferencia entre ninguno de ellos.

Cabe destacar que, pese a que se obtiene el mismo volumen total regulado con los tres algoritmos utilizados, no ocurre lo mismo si estudiamos la evolución de los volúmenes embalsados en cada embalse por separado. En las figuras 4.5 y 4.6, correspondientes al volumen regulado por los embalses de Arenós y Sichar respectivamente, se pueden observar las diferencias en los resultados obtenidas con cada algoritmo de resolución de la red de flujo. De todas formas, como ya se ha comentado anteriormente, se puede observar cómo el volumen correspondiente al último mes del periodo de optimización es el mismo en los tres casos e igual a 54.87Hm³ en el caso del embalse de Arenós y 0 Hm³ en del embalse de Sichar.

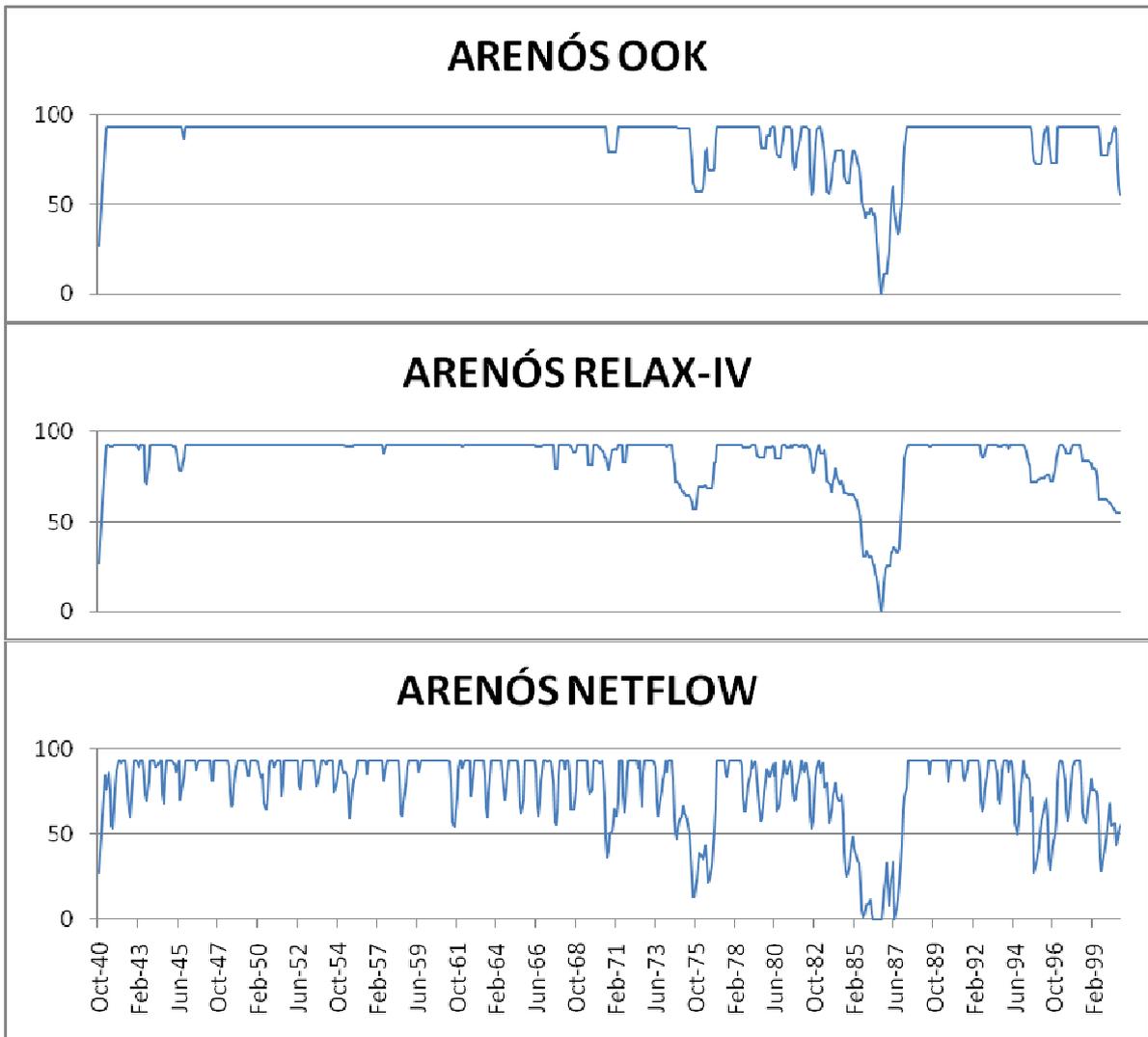


Figura 5.5. Evolución del volumen almacenado en el embalse de Arenós, durante el periodo de optimización de 720 meses, para cada uno de los tres algoritmos comparados.

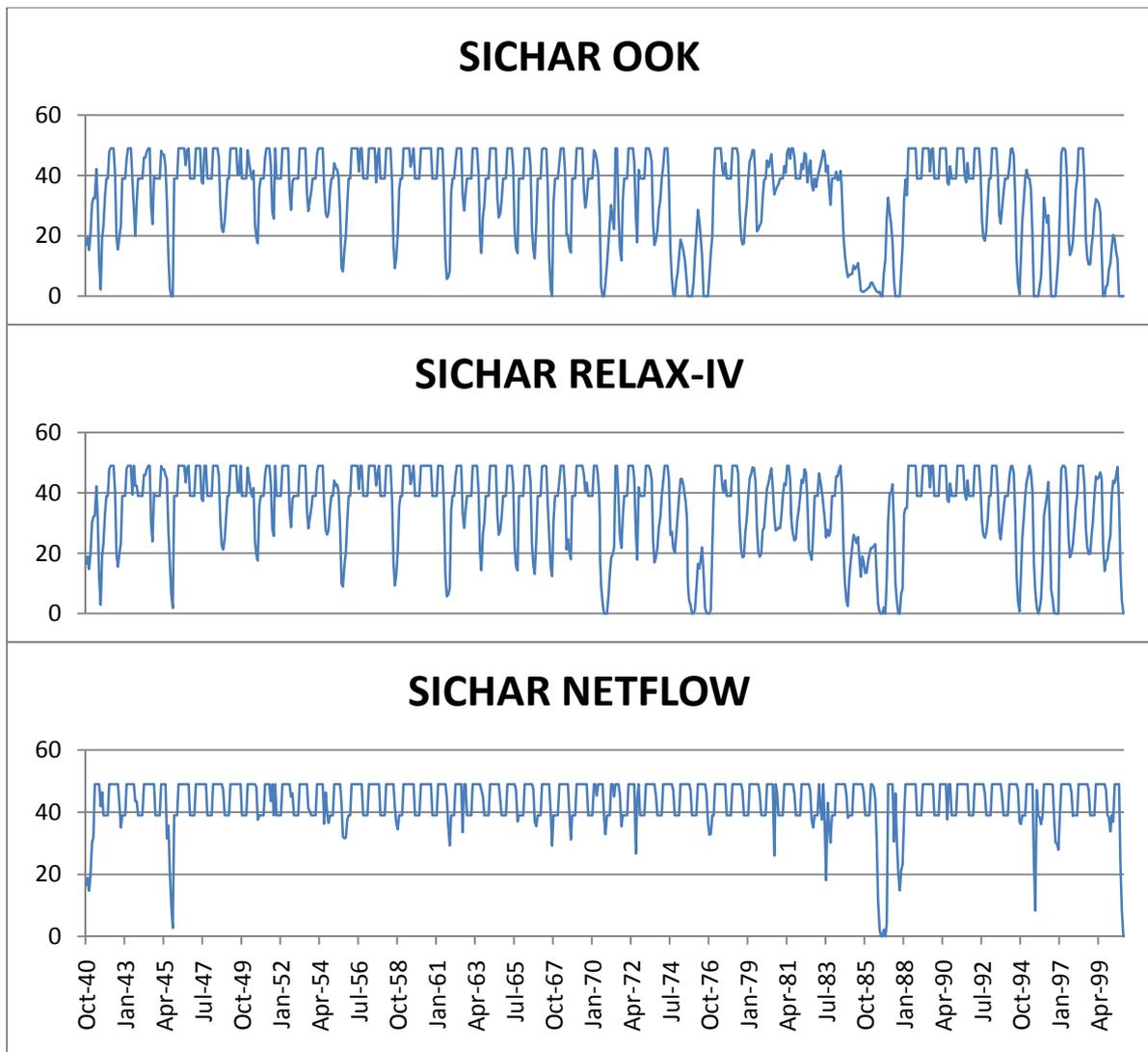


Figura 5.6. Evolución del volumen almacenado en el embalse de Sicchar, durante el periodo de optimización de 720 meses, para cada uno de los tres algoritmos comparados.

La diferencia en los resultados obtenidos en cada embalse por separado es debida, principalmente a que el óptimo del sistema no se corresponde con un único punto, sino que se corresponde con un hiperplano en cuyos puntos la función objetivo tiene el mismo valor. Este aspecto, sumado a la diferente metodología de búsqueda empleada por cada algoritmo, hace que se alcancen soluciones diferentes en los resultados pormenorizados del sistema aunque iguales en conjunto.

5.3. Introducción de no linealidades en la optimización del sistema

A continuación se trata la inclusión de aspectos en el sistema cuyo comportamiento no es lineal y, por tanto, no pueden resolverse directamente con la red de flujo. Para resolver este problema sin dejar de utilizar redes de flujo se recurre a las iteraciones.

El procedimiento para realizar las iteraciones que se sigue en OPTIGES consiste en resolver una red de flujo que inicialmente tiene asignados flujos nulos a través de los

arcos correspondientes a los elementos que representan las no linealidades. Posteriormente, y en base al resto de flujos circulantes en el sistema, se calcula el valor del flujo que debería circular a través de los arcos anteriormente descritos. El valor obtenido en cada arco se compara con el valor anterior (que en el caso de la primera iteración es cero) y si la diferencia es menor que un valor previamente definido, que en adelante llamaremos criterio de convergencia, se considera que no es necesario seguir realizando iteraciones y el último valor calculado se corresponde con el valor solución. Cabe notar que el criterio de convergencia debe cumplirse a la vez en todos los arcos del sistema y que si no se cumple, aunque sea sólo en uno, el modelo realizará una nueva iteración.

En el caso de la evaporación en los embalses, el procedimiento de cálculo consiste en obtener la superficie media del embalse en el mes a partir de los valores del volumen almacenado al inicio y al final del mismo y la curva superficie-volumen asociada al embalse, que el usuario debe definir como datos al crear el modelo de optimización.

El cálculo de los retornos de las demandas se realiza mediante la multiplicación del suministro a cada demanda por el porcentaje de retorno que le corresponda en cada mes, que también es un dato que el usuario debe definir durante la creación del modelo de optimización.

En los siguientes apartados se presentan los resultados de la inclusión de iteraciones en el modelo de optimización³. Se comenzará por introducir los aspectos no lineales por separado y posteriormente se incluirán de forma conjunta. Además de a los indicadores de bondad de las soluciones observados en el apartado anterior, se prestará especial atención al número de iteraciones realizadas por cada algoritmo antes de alcanzarse la convergencia, así como al tiempo de ejecución total del modelo de optimización (lectura de datos, inicialización, resolución de las iteraciones y escritura de resultados).

5.3.1. Optimización del sistema teniendo en cuenta los retornos de las demandas.

Se definieron dos elementos de retorno, uno conectado a la demanda “Cota 220” y otro conectado a las otras dos demandas. Los coeficientes de retorno se definieron como el 10% del suministro en las demandas “Cota 220” y “Cota 100” y del 20% en la demanda “Riegos Tradicionales”. El retorno de la demanda “Cota 220” se envía al embalse de Sichar y el de las otras dos demandas al nudo anterior al nudo final (se incluyó un nudo intermedio en la conducción entre el embalse de Sichar y el nudo final para poder introducir el segundo elemento de retorno ya que AQUATOOL no permite

³ Se mostrarán los resultados correspondientes al horizonte de optimización de 720 meses por considerarlos más ilustrativos, debido al mayor tamaño de la red de flujo resuelta, que horizontes menores.

la llegada de elementos de retorno al nudo final). El esquema resultante de la inclusión de los nuevos elementos de retorno se muestra en la figura 4.7.

La evolución del valor de la función objetivo a lo largo de las distintas iteraciones, así como el número de estas, que realiza cada algoritmo se muestra en la figura 4.8. Se puede observar como el valor final de la misma es prácticamente el mismo para los tres algoritmos empleados.

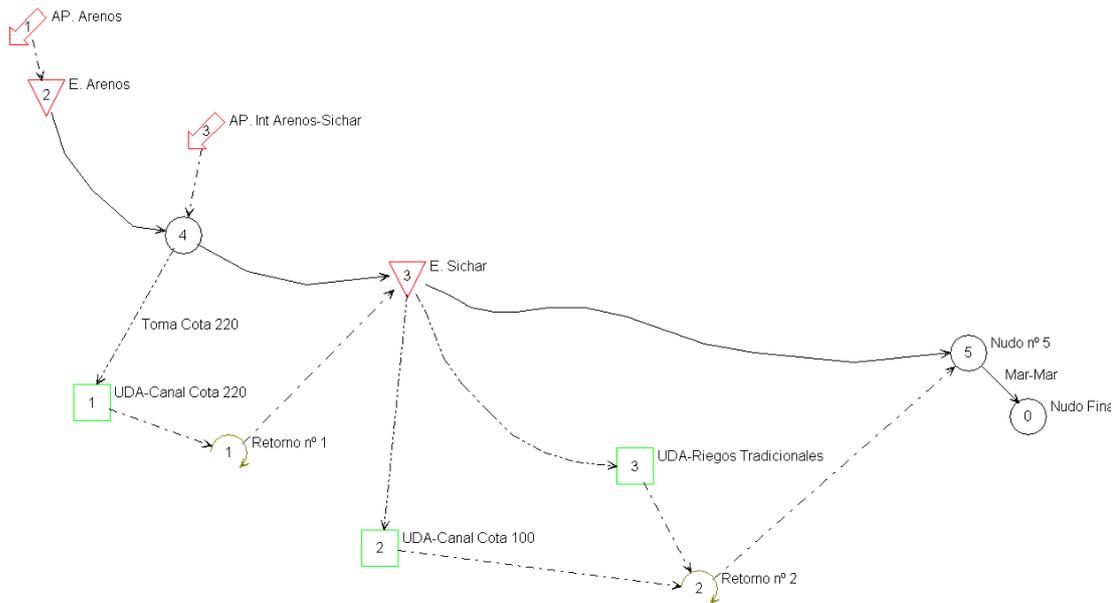


Figura 5.7. Modelo simplificado del sistema Mijares modificado para la inclusión de elementos de retorno.

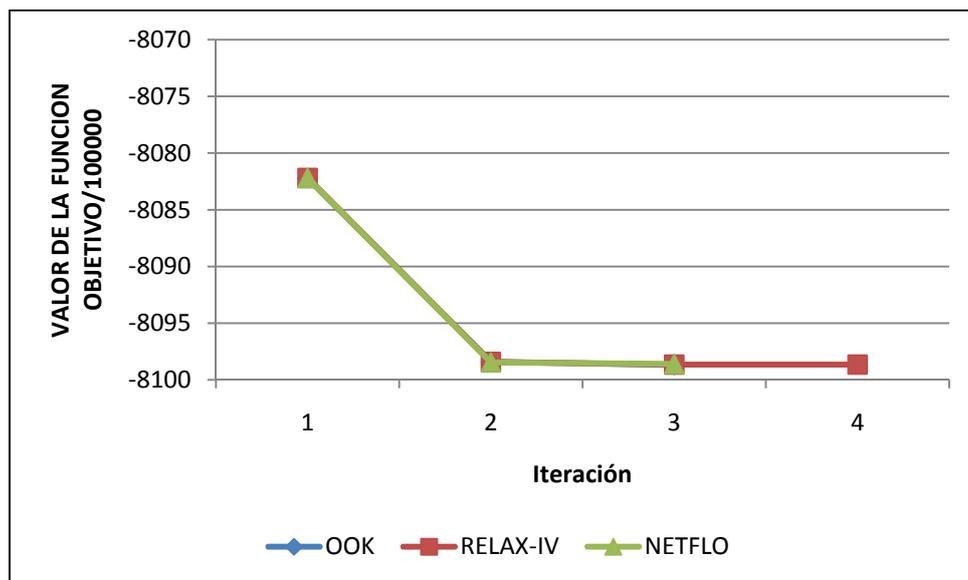


Figura 5.8. Evolución del valor de la función objetivo con el número de iteraciones para el horizonte de optimización de 720 meses.

Al igual que para el valor de la función objetivo, el resto de indicadores que reflejan el funcionamiento adecuado de los tres algoritmos presentan valores muy cercanos entre sí, siendo las pequeñas diferencias debidas principalmente al proceso iterativo. En las tablas que se incluyen a continuación se presentan los valores de los retornos, déficits de las demandas y volumen de agua vertido al mar a través de la última conducción del sistema.

RETORNOS TOTALES			
	OOK	RELAX-IV	NETFLOW
RETORNO 1	139.46	139.43	139.37
RETORNO 2	1177.08	1177.27	1177.33
TOTAL	1316.54	1316.7	1316.7

Tabla 5.4. Volumen total retornado por las demandas a través de cada elemento de retorno para el horizonte de optimización de 720 meses.

DÉFICITS TOTALES			
	OOK	RELAX-IV	NETFLOW
COTA 220	32.67	32.98	33.56
COTA 100	44.53	45.11	44.89
R. TRAD	85.91	85.05	84.75
TOTAL	163.11	163.14	163.2

Tabla 5.5. Déficit total en cada demanda para el horizonte de optimización de 720 meses.

VOLUMEN VERTIDO AL MAR			
	OOK	RELAX-IV	NETFLOW
TOTAL	6237.07	6237.26	6237.32

Tabla 5.6. Volumen total vertido al mar a través de la última conducción del sistema para el horizonte de optimización de 720 meses.

En cuanto al tiempo de ejecución del programa OPTIGES empleando cada uno de los diferentes algoritmos, se puede observar, en la figura 4.9, como el tiempo de ejecución cuando se emplea el algoritmo RELAX-IV, que anteriormente se había visto que es el más rápido, sigue siendo el algoritmo con menor tiempo de ejecución. Además, cabe destacar, respecto al tiempo de ejecución de cada iteración, que, dependiendo del tipo de solución factible inicial que se proporcione al algoritmo, se pueden alcanzar tiempos de ejecución sucesivos cada vez menores. En la figura 4.10 se puede comprobar cómo el tiempo de ejecución de cada iteración de Out-of-Kilter disminuye progresivamente debido a que, en cada nueva iteración, se toma como solución factible inicial la solución obtenida en la iteración anterior mientras que, con los otros dos algoritmos, la solución factible inicial se inicializa siempre como cero⁴ y, por tanto, el tiempo de resolución de la red de flujo es aproximadamente el mismo cada vez.

⁴ En sucesivas versiones de OPTIGES empleando RELAX-IV y NETFLO se implementará la inicialización de cada iteración con la solución de la iteración anterior.

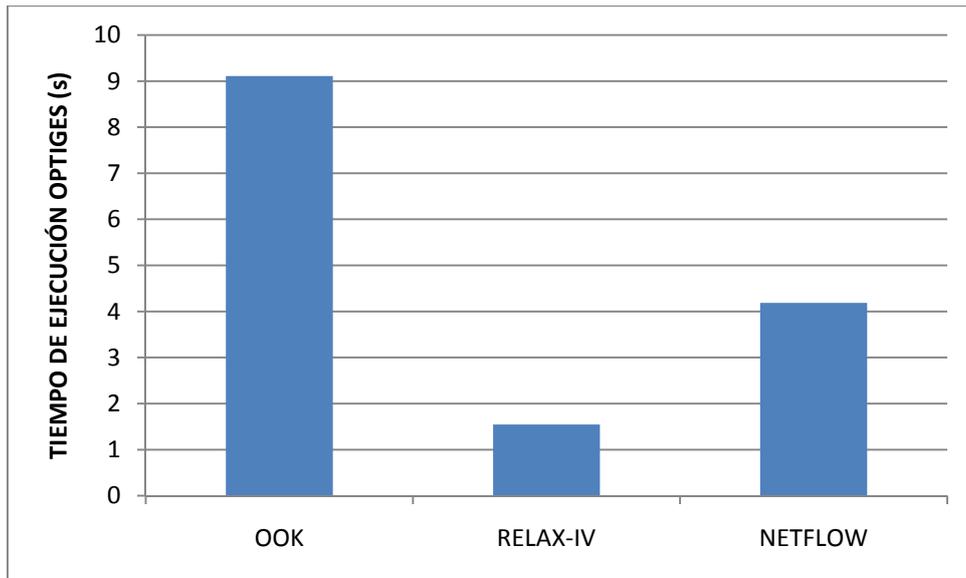


Figura 5.9. Tiempo de ejecución del modelo de optimización con cada algoritmo para el horizonte de optimización de 720 meses.

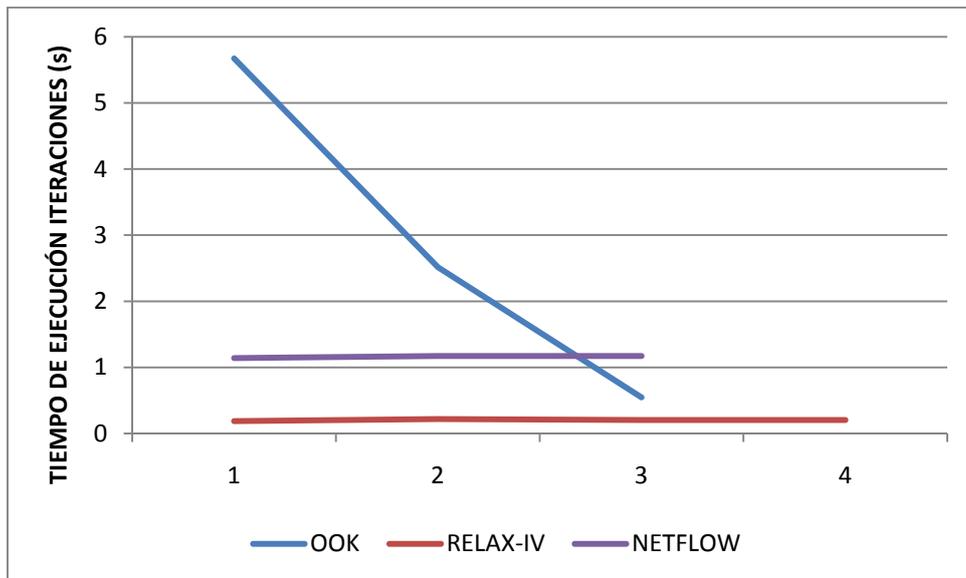


Figura 5.10. Tiempo de ejecución de cada iteración del modelo de optimización con cada algoritmo para el horizonte de optimización de 720 meses.

5.3.2. Optimización del sistema teniendo en cuenta la evaporación en los embalses.

En este apartado se introduce, como aspecto no lineal, la evaporación en los embalses. La tasa de evaporación es un dato que el usuario debe definir en la ventana correspondiente en el programa AQUATOOL al definir las características del modelo. Para posibilitar una reproducción del modelo presentado se incluye en la tabla 4.7 la tasa de evaporación correspondiente a cada embalse.

	TASA DE EVAPORACIÓN (mm/mes)	
MES	ARENÓS	SICCHAR
Octubre	57.4	65.6
Noviembre	36.4	41.6
Diciembre	30.1	34.4
Enero	34.3	39.2
Febrero	52.5	60
Marzo	63.7	72.8
Abril	83.3	95.2
Mayo	109.2	124.8
Junio	126.7	144.8
Julio	153.3	175.2
Agosto	127.4	145.6
Septiembre	90.3	103.2

Tabla 5.7. Tasa de evaporación en los embalses del modelo.

En este caso, observamos comportamientos distintos de cada uno de los algoritmos que, aún así, pueden justificarse sin problemas. En primer lugar, en la figura 4.11, sorprende encontrarse con unos resultados de la función objetivo dispares, sobre todo por parte del algoritmo NETFLO, cuyo valor difiere bastante respecto del obtenido con los otros dos. También cabe observar la cantidad de iteraciones que se realiza en el caso de RELAX-IV.

La diferencia en el valor de la función objetivo es debida a la diferente gestión de los embalses que realiza cada algoritmo, como ya se comentó en el apartado 3.2. Debido a estas diferencias en el volumen almacenado en cada embalse cada mes, el valor calculado para la evaporación a través de las iteraciones será diferente en cada caso. Esto, unido a que el coste de circulación del flujo a través de los arcos asociados a la evaporación es muy alto, para forzar así la circulación del flujo correspondiente, hace que el valor de la función objetivo difiera bastante de un algoritmo a otro. Aún así la diferencia no es significativa dado el orden de magnitud de los valores numéricos manejados.

El caso del número de iteraciones se analizará más en profundidad en el apartado 4.4.

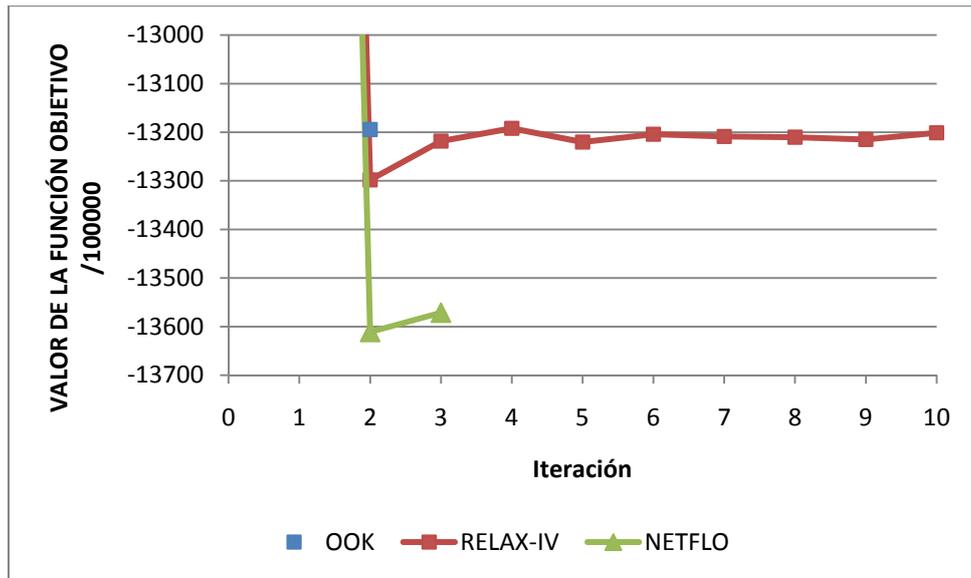


Figura 5.11. Evolución del valor de la función objetivo con cada iteración para un horizonte de optimización de 720 meses.

En cuanto a los resultados del resto de indicadores de bondad, se observan pequeñas diferencias debidas, principalmente a lo ya comentado previamente en este apartado y en el anterior.

EVAPORACION TOTAL			
	OOK	RELAX IV	NETFLO
ARENÓS	177.56	173.28	155.12
SICCHAR	166.05	171.33	213.92
TOTAL	343.61	344.61	369.04

Tabla 5.8. Volumen total evaporado en los embalses para un horizonte de optimización de 720 meses.

DÉFICITS TOTALES			
	OOK	RELAX-IV	NETFLO
COTA 220	44.31	44.41	44.93
COTA 100	61.44	61.38	61.49
R. TRAD	118.22	119.76	122.33
TOTAL	223.97	225.55	228.75

Tabla 5.9. Déficit total en cada demanda para el horizonte de optimización de 720 meses.

TOTAL AL MAR			
	OOK	RELAX IV	NETFLOW
TOTAL	4654.91	4656.38	4636.97

Tabla 5.10. Volumen total vertido al mar a través de la última conducción del sistema para el horizonte de optimización de 720 meses.

Puede observarse como, debido a la mayor evaporación calculada con NETFLO, el déficit del sistema es mayor y las salidas al mar son menores.

En cuanto al tiempo de ejecución, se siguen manteniendo los bajos tiempos de resolución de cada iteración pero debido a que RELAX-IV alcanza el máximo de

iteraciones (200) antes de que se alcance el criterio de convergencia, el tiempo que OPTIGES tarda en ejecutarse con este algoritmo es muy superior al empleado con los otros algoritmos, que sí alcanzan una rápida convergencia. Cuando se trate el tema de la convergencia de RELAX-IV más adelante se realizarán unas comparaciones de tiempos de ejecución y se retomará este punto. Se adelanta ya que, con un número adecuado de iteraciones, RELAX-IV sigue siendo el algoritmo más prometedor.

5.3.3. Optimización del sistema teniendo en cuenta evaporación y retornos.

Una vez observado el comportamiento de los diferentes algoritmos con las no linealidades que permite incluir el programa OPTIGES por separado, en el apartado que sigue se combinan ambas posibilidades.

Los datos empleados para llevar a cabo este apartado son los mismos que los empleados para realizar los apartados anteriores sobre el esquema modificado para incluir los elementos de retorno.

Los resultados obtenidos esta vez no suponen nada nuevo respecto a los obtenidos en los dos apartados anteriores salvo por ser una combinación de ambos. Se observa una diferencia más notable del valor de la función objetivo así como del número de iteraciones, que siguen alcanzando el máximo definido en OPTIGES con el algoritmo RELAX-IV. Mientras los resultados asociados a los retornos son muy similares con los tres algoritmos, el valor de la evaporación sigue dependiendo mucho de la gestión de los embalses que realiza cada uno y, como ya se observó anteriormente, resulta mayor para OPTIGES con el algoritmo NETFLO. Debido a las diferencias en las evaporaciones se tienen, de igual forma, diferencias en los déficits y en el agua vertida al mar. En las siguientes figuras se muestran los resultados obtenidos para una resolución del modelo para un horizonte de optimización de 720 meses.

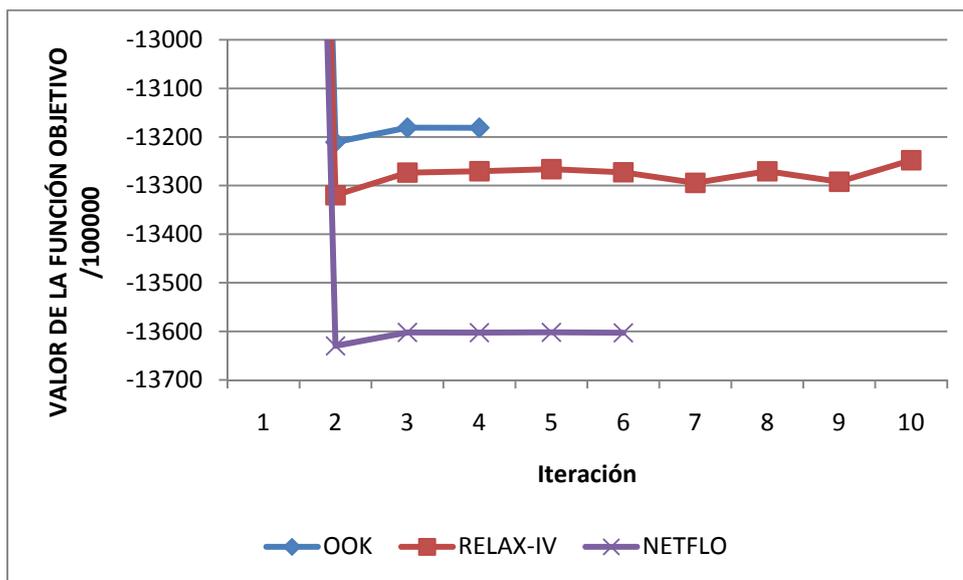


Figura 5.12. Evolución del valor de la función objetivo con cada iteración para un horizonte de optimización de 720 meses.

	EVAPORACIÓN TOTAL		
	OOK	RELAX-IV	NETFLO
ARENOS	176.87	173.82	156.74
SICHAR	164.81	173.34	213.37
TOTAL	341.68	347.16	370.11

Tabla 5.11. Volumen total evaporado en los embalses para un horizonte de optimización de 720 meses.

	RETORNO TOTAL		
	OOK	RELAX-IV	NETFLO
RETORNO 1	138.56	138.46	138.38
RETORNO 2	1171.28	1171.36	1170.83
TOTAL	1309.84	1309.82	1309.21

Tabla 5.12. Volumen total retornado por las demandas a través de cada elemento de retorno para el horizonte de optimización de 720 meses.

	DÉFICITS TOTALES		
	OOK	RELAX-IV	NETFLO
COTA 220	41.66	42.63	43.55
COTA 100	57.19	57.85	58.19
R. TRAD.	108.92	108.7	110.72
Total	207.77	209.18	212.46

Tabla 5.13. Déficit total en cada demanda para el horizonte de optimización de 720 meses.

	TOTAL AL MAR		
	OOK	RELAX-IV	NETFLO
TOTAL	5944.11	5941.62	5922.52

Tabla 5.14. Volumen total vertido al mar a través de la última conducción del sistema para el horizonte de optimización de 720 meses.

En cuanto al tiempo de ejecución, RELAX-IV sigue siendo el algoritmo el más rápido.

5.4. Análisis de resultados.

Aunque a lo largo de la presentación de resultados ya se ha analizado parte de los mismos, en este apartado se comentarán/resumirán los más importantes para el desarrollo de esta tesina.

Para comenzar, se ha podido observar, claramente, que se cumplen las consideraciones realizadas en el capítulo anterior acerca de la eficacia de los algoritmos empleados en la comparación realizada en el presente apartado. Así, hemos comprobado que el algoritmo RELAX-IV es, de los tres estudiados, el más eficiente en la resolución de una red de flujo. Al respecto de los tiempos de ejecución

también se puede observar, apoyándose en la figura 2 y las tablas 2 y 3, que el incremento del tiempo de ejecución con el tamaño de la red no es tan rápido en el algoritmo RELAX-IV como en los otros dos, y que éste puede llegar a ser casi 80 veces más rápido que el algoritmo Out-of-Kilter, utilizado hasta ahora.

Se ha podido ver que, dependiendo del algoritmo empleado para la resolución de una misma red, se obtenían resultados que no tenían demasiado que ver unos con otros. Este aspecto es mucho más notable en la operación de los embalses, especialmente debido a que la red resuelta sólo tiene en cuenta la prioridad de uno respecto del otro en el último mes del periodo de optimización. Por esta razón, cada algoritmo, por sus diferentes metodologías de búsqueda del óptimo asigna los flujos en los arcos como mejor le conviene aunque, al final, el valor de la función objetivo sea el mismo. Se comprobó que si la prioridad de un embalse respecto a otro se hacía extensiva a todo el periodo de optimización, todos los algoritmos ofrecían un mismo valor de todos los resultados.

Una vez comprobado qué algoritmo de resolución resulta más rápido, es necesario centrarse en su implementación en OPTIGES y comprobar su comportamiento cuando se hace uso de las posibilidades que ofrece el programa de introducir algunos elementos de comportamiento no lineal mediante iteraciones. Dado que las iteraciones en OPTIGES se realizan resolviendo cada vez una red de flujo distinta, ya podía discernirse de los resultados de las comparaciones en la resolución de una red de flujo pura que RELAX-IV sería también el algoritmo más eficiente aunque, mediante la resolución de los diferentes casos, se ha podido comprobar la existencia de problemas en cuanto a la convergencia de los resultados.

Aunque no ocurre en el caso de los retornos de las demandas, cuando se introducen evaporaciones en los embalses, se comprueba cómo el modelo funcionando con el algoritmo RELAX-IV no alcanza la convergencia de las soluciones y se llega al máximo de iteraciones. Que esto se dé sólo en uno de los casos en que se realizan iteraciones (dos si se tiene en cuenta el ejemplo en que se consideran las dos posibilidades conjuntamente) permite pensar que el problema no es debido al algoritmo en sí, sino al criterio de convergencia escogido.

Cuando se realizan las comparaciones entre el valor calculado en la iteración anterior y el calculado en la presente iteración, se exige que la diferencia sea menor que un valor definido internamente en el programa (NEPSI) y que actualmente es igual a 4, lo que viene a representar 0.04Hm^3 , sin que el usuario pueda modificarlo. Cabe la posibilidad de que este valor sea muy reducido según el sistema considerado y que, sumado al hecho de que el óptimo no se corresponde con una única solución, el algoritmo arroje soluciones próximas entre sí cada vez, pero no lo suficiente como para cumplir el criterio de convergencia, mientras que el valor de la función objetivo se mueve alrededor de un valor central.

Resulta interesante, por lo tanto, estudiar el efecto que tendría modificar el criterio de convergencia en los resultados arrojados por el modelo. Para ello se ha empleado el último de los casos estudiados anteriormente, en el que se tenía evaporación y retornos al mismo tiempo. Se incrementó el valor de NEPSI gradualmente para comprobar en qué momentos se reducía el número de iteraciones efectuadas por RELAX-IV. De esta forma se obtiene una gráfica como la que se presenta en la figura 4.13. En ella se puede ver como para valores de NEPSI menores de 9, se realizan más de 200 iteraciones, entre 9 y 10 se realizan 157 iteraciones y, a partir de 11, sólo tres iteraciones. Con esto, se compararon los resultados pormenorizados de emplear cada uno de los valores clave de la variable NEPSI. Así se obtuvieron los valores mostrados en las tablas 4.15 a 4.18.

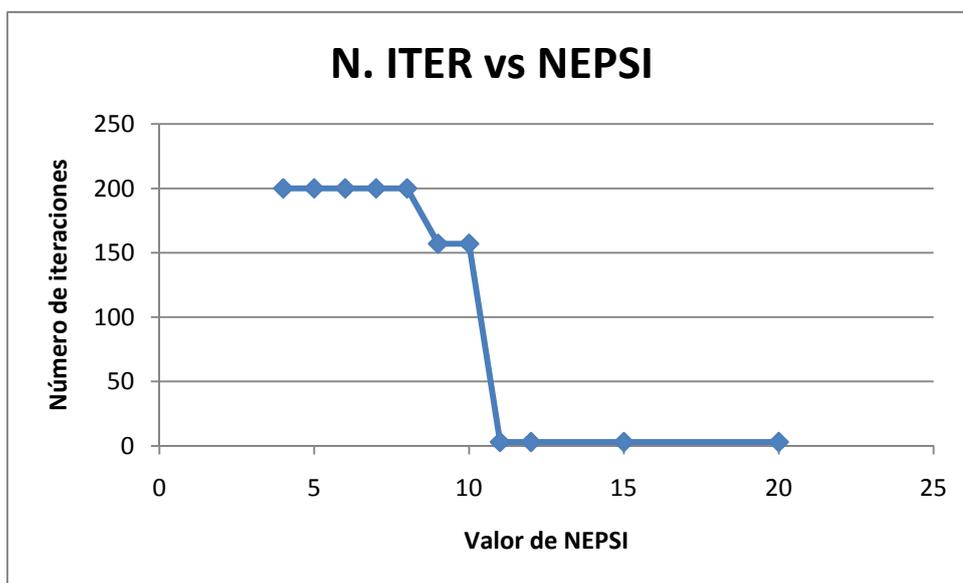


Figura 5.13. Número de iteraciones según el valor de la variable NEPSI.

	EVAPORACIÓN TOTAL		
	NEPSI=4	NEPSI=9	NEPSI=11
ARENOS	173.82	172.94	173.3
SICHAR	173.34	175.97	174.6
TOTAL	347.16	348.91	347.9

Tabla 5.15. Volumen total evaporado en los embalses para un horizonte de optimización de 720 meses.

	RETORNO TOTAL		
	NEPSI=4	NEPSI=9	NEPSI=11
RETORNO 1	138.46	138.47	138.56
RETORNO 2	1171.36	1171.44	1171.31
TOTAL	1309.82	1309.91	1309.87

Tabla 5.16. Volumen total retornado por las demandas a través de cada elemento de retorno para el horizonte de optimización de 720 meses.

	DÉFICITS TOTALES		
	NEPSI=4	NEPSI=9	NEPSI=11
COTA 220	42.63	42.29	42.21
COTA 100	57.85	58.2	58.48
R. TRAD.	108.7	108.36	108.19
Total	209.18	208.85	208.88

Tabla 5.17. Déficit total en cada demanda para el horizonte de optimización de 720 meses.

	TOTAL AL MAR		
	NEPSI=4	NEPSI=9	NEPSI=11
TOTAL	5941.62	5940.12	5940.95

Tabla 5.18. Volumen total vertido al mar a través de la última conducción del sistema para el horizonte de optimización de 720 meses.

Como se puede ver en las tablas de resultados mostradas, éstos no difieren mucho unos de otros independientemente del valor de la variable NEPSI. Este hecho nos hace pensar que el criterio de convergencia está influido directamente por las características del sistema estudiado y, por lo tanto, deberá definirse un criterio distinto según éstas cada vez. Una posibilidad que se plantea es sustituir el proceso de comprobación de la convergencia que se está empleando actualmente, que consiste en comprobar la convergencia de todos y cada uno de los resultados relacionados con la variable correspondiente a cada proceso no lineal, por uno más sencillo, pero no por ello de menor exigencia, como podría ser realizar la comprobación de convergencia únicamente con el valor que más se diferenciase de la iteración anterior y confirmar que la desviación no es mayor que el orden de magnitud que se está manejando con dicha variable.

Pese a lo comentado en el párrafo anterior sobre el criterio de convergencia, se ha podido observar anteriormente en los resultados que el valor de la función objetivo oscilaba alrededor de un valor prácticamente fijo a lo largo de todas las iteraciones. En la figura 4.14 se muestra la evolución de la función objetivo a lo largo de las 200 iteraciones que realiza el modelo con RELAX-IV. En ella se puede observar como ésta oscila alrededor de un valor medio que se ha estimado en $-13273 \cdot 10^5$, marcado en la gráfica. Esto, unido al hecho observado anteriormente de la escasa variación de los resultados independientemente del número de iteraciones, permite considerar también la posibilidad de aceptar el resultado obtenido al final de un cierto número de iteraciones sin necesidad de variar el criterio de convergencia.

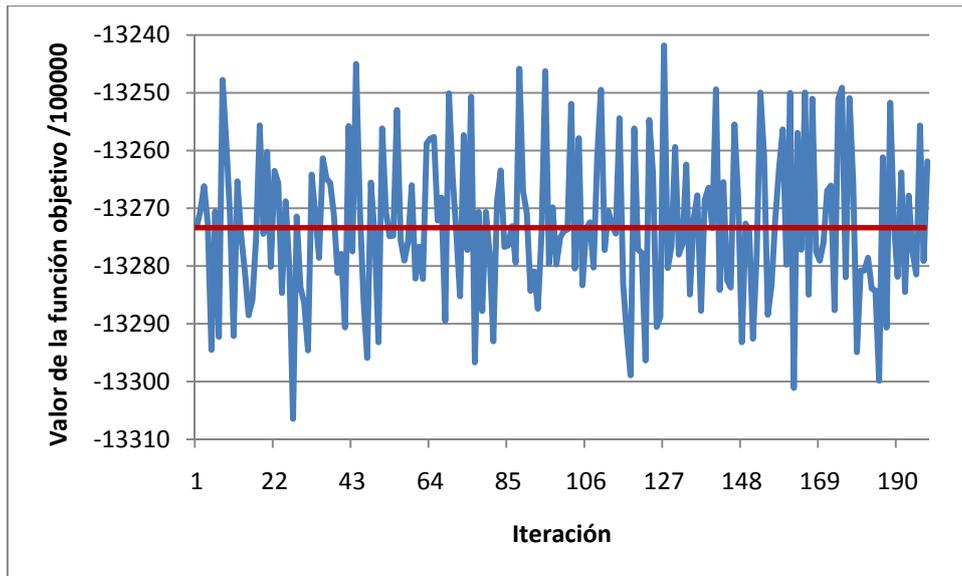


Figura 5.14. Evolución del valor de la función objetivo a lo largo de 200 iteraciones con OPTIGES con RELAX-IV.

Los dos aspectos comentados acerca de la convergencia del modelo trabajando con RELAX-IV han de comprobarse más en profundidad mediante la aplicación de este algoritmo a otros esquemas de sistemas de recursos hídricos para averiguar si este comportamiento es generalizado y, entonces, poder definir las posibles metodologías para darle una solución, y que serán germen de futuros estudios al respecto de lo tratado en el presente informe.

Una última consideración que se puede hacer al respecto de la convergencia del algoritmo, y que diverge en cierta manera del camino definido en los párrafos anteriores, es la posibilidad de alcanzar una convergencia más rápida si se emplease como solución factible inicial de cada iteración de RELAX-IV la solución de la iteración anterior, como así se hace con Out-of-Kilter y que, además, acelera el proceso de búsqueda del óptimo al partir de una solución mucho más cercana a este que si se parte cada vez de la solución de compromiso en que todos los flujos iniciales son nulos.

5.5. Consideraciones finales del capítulo 5

De la comparación de los algoritmos de resolución de redes de flujo aplicados a la optimización de un sistema de recursos hídricos, se puede concluir que RELAX-IV va a permitir mejorar, notablemente, el funcionamiento de OPTIGES respecto a su funcionamiento actual con el algoritmo Out-of-Kilter.

La eficiencia del nuevo algoritmo, más de 80 veces más rápido que el actual, debería permitir plantear la optimización de sistemas de tamaños y complejidad mucho mayores en tiempos lo suficientemente razonables como para plantear estudios de mayor extensión, pudiéndose plantear más alternativas, aspecto poco atractivo si cada ejecución del algoritmo lleva aparejada una gran cantidad de tiempo. Si unimos esto a los últimos avances en técnicas de computación, mediante paralelización de los

procesos en un mayor número de núcleos de cálculo, es razonable pensar que las mejoras pueden ser muy beneficiosas.

Aparte de la posibilidad de llevar a cabo estudios con periodos de optimización mucho más largos, la velocidad del algoritmo RELAX-IV permitirá también la realización de muchas más iteraciones en menos tiempo, lo que propicia dar un paso más en el desarrollo del modelo OPTIGES y pasar a la incorporación de nuevos elementos al modelo. Estos nuevos elementos permitirán crear esquemas mucho más detallados cuyos resultados serán más representativos del funcionamiento real de los sistemas de recursos hídricos estudiados.

Pese a lo prometedor del algoritmo, se han planteado problemas de convergencia de las soluciones cuando éste se emplea para resolver sucesivamente redes de flujo con pequeñas diferencias entre sí. Se han localizado diversas causas y posibles soluciones a las mismas que tendrán que estudiarse, y compararse, en subsiguientes investigaciones de forma que podamos plantear la mejor metodología a seguir en el futuro.

A la lectura de este documento, ya existirá una versión del modelo OPTIGES que permitirá la resolución del esquema de recursos hídricos con el algoritmo RELAX-IV, y en que se puedan incluir aspectos tales como los volúmenes mínimos de embalse y caudales mínimos en conducciones que, para el desarrollo de este apartado, se habían obviado.

6. Incorporación de la modelación de acuíferos en el modelo OPTIGES

Con la obtención e implementación de un algoritmo de resolución de redes de flujo mucho más eficiente que el que se tenía inicialmente, se plantea la posibilidad de incluir en el modelo de optimización, que recordemos se basa en el modelo OPTIGES, elementos que, hasta el momento, no se habría pensado en incluir por la carga de cálculo que ello introduciría en la ejecución de los estudios.

Existen diversos elementos que interesaría incluir en OPTIGES, encaminando el desarrollo de la herramienta hacia alcanzar una gran similitud con el modelo SIMGES de simulación de cuencas, también incluido en el Sistema de Soporte a la Decisión AQUATOOL. Debido a que el proceso de implementación de cada uno de los nuevos elementos en la herramienta conlleva un periodo de programación, depuración y verificación de resultados, se ha optado por presentar en esta tesis el desarrollo de uno sólo de estos elementos, siendo el elegido los acuíferos. Para futuros estudios quedan pendientes la incorporación de las centrales hidroeléctricas y el tiempo de viaje.

Se decidió empezar por los acuíferos por considerar a éstos elementos clave en la planificación de muchas cuencas. Gracias a los acuíferos se puede abastecer o complementar el abastecimiento a numerosas demandas, siendo las más beneficiadas las demandas agrícolas, sobretudo en épocas de escasez de agua superficial durante las cuales, y gracias a los bombeos, se salvan muchos cultivos. Aún así, los bombeos indiscriminados pueden resultar en una sobreexplotación del acuífero, lo que puede acarrear problemas de muy distinta índole tanto a los abastecimientos por bombeo, como a ríos conectados al acuífero en incluso a zonas muy alejadas de los mismos. Es por todas estas razones por las que, incluir los acuíferos en la optimización resultaría muy beneficioso permitiendo obtener, por ejemplo, reglas para la aplicación de bombeos en las demandas o reglas de operación de embalses teniendo en cuenta la posibilidad de realizar bombeos adicionales.

A lo largo de este capítulo se explicarán los cambios internos realizados en el código de OPTIGES para la introducción de los acuíferos dentro del cálculo de la red de flujo, así como de los elementos asociados a los mismos (filtraciones, bombeos, conexión con el río, etc.). Se presentará también una aplicación a un caso sencillo para comprobar el funcionamiento de la nueva implementación.

6.1. Cambios internos introducidos en el modelo

La introducción de los acuíferos en el modelo exige que se incluyan también una serie de elementos, modificaciones o nuevas capacidades en diferentes elementos ya existentes del mismo.

En primer lugar, por supuesto, es necesario introducir el elemento acuífero en sí dentro de la red de flujo mediante la modificación de la rutina GENGRA, que es donde se crean la red de flujo que posteriormente se resuelve. En una primera fase se ha decidido incorporar únicamente los modelos de acuífero uni y pluricelular, siendo el primero un caso particular del segundo. Posteriormente se incluirán todos los demás modelos de acuífero existentes en SIMGES, a saberse, autovalores, depósito, manantial, rectangular homogéneo con conexión por uno y dos de sus lados y tres niveles. Un acuífero, de forma aproximada, se puede tratar como un embalse, con sus entradas y salidas que afectarán al volumen del mismo y con ello a la afección que éste tendrá sobre los ríos a los que esté conectado. Así, el acuífero contará con un arco de volumen inicial conectado al nudo de balance y posteriormente una distribución de arcos como la que se puede ver en la figura 5.1 en los que hay arcos dirigidos en sentido creciente del tiempo y arcos en el sentido contrario dado que el acuífero se puede utilizar para, en cierta manera, obtener agua del futuro.

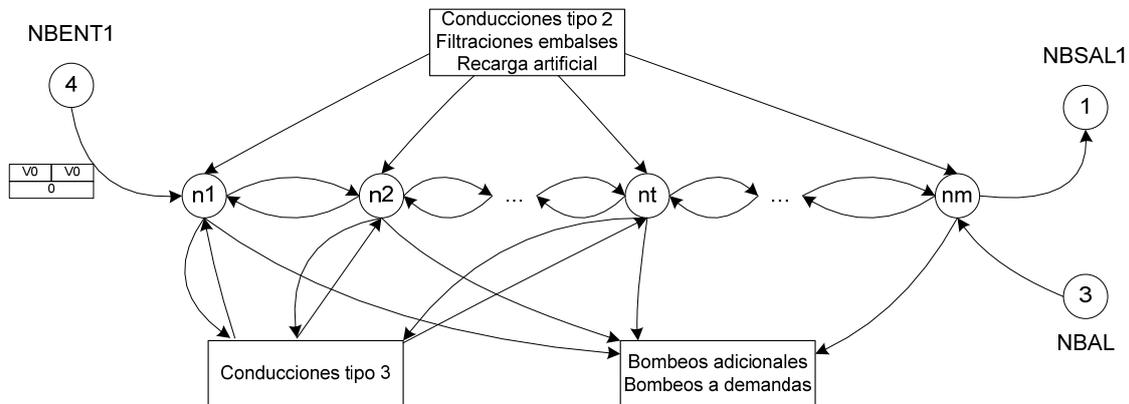


Figura 6.1 Representación del conjunto de arcos y nudos que se incluyen en la red de flujo y las entradas y salidas que éste tiene

Asociados al acuífero se encuentran todos los flujos que suponen las entradas y salidas del mismo. Cada uno de estos flujos está, a su vez, asociado a un elemento ya existente en el modelo o requiere de la creación de uno nuevo.

En la definición de conducciones se ha agregado la posibilidad de definir las de tipo 2 y las de tipo 3. Las conducciones tipo 2 son aquellas que presentan pérdidas que recargan el acuífero siguiendo una ley de filtraciones de la forma $P = a + bV^c$, donde P representa las pérdidas, V el volumen circulante por la conducción, y a, b y c son tres coeficientes que deberán definirse en cada caso. Las conducciones tipo 3 son aquellas que están conectadas al acuífero y perderán o ganarán agua según el estado del

mismo. A partir del modelo de acuífero escogido, será el caudal entre éstas últimas y el acuífero lo que se calculará.

Para representar las filtraciones de los embalses se ha seguido el mismo camino que con las conducciones tipo 2, con una ley de filtraciones similar en la que el valor de cálculo será el volumen almacenado. Respecto a las filtraciones de las demandas, se añadió un coeficiente de consumo al coeficiente de retorno ya existente de forma que, si se establece que el agua sobrante de la demanda que no retorna al sistema se infiltra al acuífero, el caudal infiltrado sea proporcional al resultado de restar a uno los dos coeficientes de retorno y consumo, que es el coeficiente de infiltración.

Las demandas pueden tener un doble efecto sobre el acuífero. Al igual que los flujos sobrantes pueden recargarlo, las demandas también pueden extraer agua del acuífero, mediante bombeos, para su propio suministro. Así, las demandas en las que se definan bombeos estarán conectadas al acuífero mediante un arco a través del cual podrá pasar agua en función del nivel de demanda que se desee cubrir con dicho bombeo y la prioridad del mismo.

Por último, se crearon dos nuevos elementos que relacionan el sistema superficial con el subterráneo como son las recargas artificiales y los bombeos adicionales. Ambos elementos suponen un arco entre el punto de aplicación y el acuífero. En el caso de las recargas artificiales, el arco se comporta como una conducción de tipo 1 ya que sólo tiene límite superior, la máxima recarga permitida, sin coste asociado. En el caso de los bombeos adicionales, aparte del límite superior asociado al máximo bombeo que se puede realizar, también existe un coste asociado al nivel de demanda para el cual se desean activar los bombeos.

6.2. Contribución de los nuevos elementos a la función objetivo

Como se ha comentado en el anterior apartado, algunos de los nuevos elementos introducidos en el modelo suponen un aporte extra a la función objetivo que se pretende minimizar. En el apéndice 1 se muestra la función objetivo que se minimiza en cada resolución de la red de flujo generada por OPTIGES. Esta ecuación está orientada a minimizar los déficits y a maximizar el volumen almacenado en los embalses. Los nuevos elementos introducidos durante el proceso de implementación de los acuíferos en el modelo deben mantener la intención original de la función objetivo o, al menos, no perjudicarla. En los próximos sub-apartados se resume la contribución de cada uno de los nuevos elementos a la función objetivo y se analiza cómo afectan a la función original.

6.2.1. Contribución de las filtraciones de los embalses y en los tramos tipo 2 y 3

Cuando se definen filtraciones en un embalse o en un tramo tipo 2, ya sean hacia el acuífero o fuera del sistema, se crea un arco con origen el nudo correspondiente al

embalse en cada mes del periodo de optimización y con nudo final el nudo correspondiente del acuífero o el nudo de balance. Para lograr que el flujo calculado como infiltrado pase por dicho arco se le asigna un coste muy alto al arco creado, de forma que el flujo no tiene más remedio que circular por él. Aún así, se mantiene la posibilidad de que a través de dicho arco circule menos flujo si no existiese disponibilidad del mismo por alguna otra razón. Este coste de infiltración del flujo afecta a la función objetivo en tanto en cuanto disminuye su valor final, ya que es un valor muy alto, pero no afecta al proceso de optimización ya que el flujo infiltrado es un flujo forzado y que no entra dentro del proceso de reparto de flujo entre las demandas ya que es un flujo no disponible.

Ocurre algo similar con las conducciones tipo 3. En este caso se tiene que una conducción tipo 3 puede perder agua hacia el acuífero o puede recibirla desde el mismo. Aún así, estos flujos siguen siendo inherentes al sistema y no son susceptibles de ser optimizados, simplemente han de ocurrir en base a las condiciones presentes en el acuífero. Por tanto, y al igual que con los embalses y los tramos tipo 2, el flujo circulante por los arcos correspondientes a la conexión del tramo con el acuífero afectarán a la función objetivo numéricamente pero no afectarán al proceso global de reparto de flujos.

6.2.2. Contribución de las filtraciones de las demandas consuntivas

Las filtraciones de las demandas, pese a ser, al igual que en el apartado anterior, un flujo dirigido hacia el acuífero que ocurre de manera forzada, se ha optado por incorporarlas a la red de una manera distinta a como se hace en el caso de los elementos tratados en el punto anterior.

Los elementos de demanda generan un subgrafo en la red de una complejidad considerable. Debido a esto, se decidió no manipular dicho subgrafo e introducir el flujo correspondiente a la filtración de la demanda del mismo modo que se introducen las aportaciones y los retornos. Esto implica, por lo tanto, que las filtraciones de las demandas no suponen ningún coste en la función objetivo.

6.2.3. Contribución de las recargas artificiales

Al igual que las filtraciones de las demandas consuntivas, las recargas artificiales no suponen un coste en la función objetivo.

Las recargas artificiales se modelan de forma que el modelo no pueda enviar agua al pasado que podría sumarse a la disponible posteriormente. Por esta razón, las recargas artificiales van al nudo de balance desde el nudo en que se realizan y, posteriormente, se reincorporan al sistema como si fueran aportaciones que, como ya se ha dicho en el punto anterior, no suponen un coste en la función objetivo.

6.2.4. Contribución de los bombeos a las demandas y de los bombeos adicionales

Ya se ha comentado que la activación de los bombeos depende del nivel de demanda al cual pueden suministrar y de la prioridad del mismo. Esto implica que la decisión de si un bombeo es activado o no (siempre que no esté impedido por alguno de los parámetros de control de bombeos), sí entra dentro del proceso de repartos de flujo dentro del algoritmo de optimización. Así, se define el coste del flujo en los arcos de bombeo mediante la siguiente expresión:

$$\text{Coste}(\text{arco de bombeo}) = K_{\beta} - K_2 \cdot \text{NIV} - K_1 \cdot \text{NPRI} + \text{entero} \left(\frac{K_1}{2} \right) \quad (5.1)$$

donde, NIV es el nivel de demanda suministrado por el bombeo, NPRI es el número de prioridad del mismo y K_{β} , K_1 y K_2 son coeficientes definidos por el usuario que, por defecto se corresponden con los valores 10000, 5 y 200 respectivamente. Estos coeficientes se corresponden con valores internos de OPTIGES cuya justificación se puede encontrar en el manual de usuario de OPTIGES.

6.3. Subrutina de simulación de acuíferos ACUIFERO

La inclusión de acuíferos en el modelo supone la introducción de un proceso altamente no lineal en el proceso de optimización. Por esta razón, el cálculo de los acuíferos se realizará de forma iterativa, al igual que el resto de no linealidades existentes hasta el momento, evaporación y retornos. Dentro de la rutina de las no linealidades (VALMOD) se calcularán inicialmente todas las afecciones al acuífero, así como los flujos hacia el acuífero que también son fruto de procesos no lineales. Así, la rutina de cálculo de los procesos no lineales quedaría como se muestra en la figura 5.2. Como se puede observar, en primer lugar se realizan todos los cálculos relacionados con los elementos no acuífero y, posteriormente, según éstos estén conectados o no, se añaden al cálculo de las afecciones al mismo. Por último, con todas las afecciones calculadas, se inicia la rutina ACUIFERO.

La rutina ACUIFERO, cuyo diagrama de funcionamiento puede verse en la figura 5.3, realiza fundamentalmente dos tareas. En primer lugar, y como su propio nombre indica, realiza la simulación de los acuíferos mes a mes en base a las acciones elementales calculadas en la rutina VALMOD y calcula las detracciones de las conducciones tipo 3. Además, realiza la comprobación de los parámetros de control de los bombeos y modifica éstos, al igual que las afecciones al acuífero, según su valor. El diagrama de flujo del proceso de comprobación de los parámetros de control más detallado se muestra en la figura 5.4.

6.3.1. Modelos de acuíferos incluidos en la subrutina

Actualmente, la subrutina ACUIFERO sólo permite la utilización de acuíferos uni y pluricelulares. Dado que los primeros son un caso particular de los segundos, la implementación de ambos modelos no suponía mayor dificultad.

Como se sabe, el volumen a fin de mes en cada una de las celdas en que se divide el acuífero (o en la única celda si el acuífero se considera unicelular) viene dado por la siguiente ecuación:

$$V_i^k = V_i^{k-1} e^{-\alpha_i \Delta t} + \sum_j \frac{b_{i,j} R_j^k}{\alpha_j} (1 - e^{-\alpha_j \Delta t}) \quad (5.1)$$

Donde R_j^k es el valor de la acción elemental j (recarga si es positivo o bombeo si el valor es negativo).

Los caudales de la relación entre río y acuífero se calcularán mediante balance hídrico del resto de las entradas y salidas de cada una de las celdas del acuífero.

En un futuro cercano se añadirán a la subrutina ACUIFERO el resto de modelos de acuífero con los que cuenta actualmente la herramienta SIMGES y que son, respectivamente: acuífero depósito, acuífero con manantial, acuífero de autovalores, acuífero rectangular homogéneo conectado con ríos totalmente penetrantes por uno o dos de sus lados y acuíferos de tres niveles.

6.3.2. Criterio de convergencia de los cálculos

Un aspecto importante de la introducción del cálculo de no linealidades de forma iterativa en el proceso de optimización es la convergencia de los cálculos. Como ya se comentó en el capítulo anterior, siempre resulta necesario definir un criterio de convergencia para determinar el final de las iteraciones y que, a su vez, se obtenga un resultado adecuado.

En el caso que nos ocupa, el cálculo que se está realizando para posteriormente modificar la red de flujo es el de las detracciones del acuífero desde los tramos conectados al mismo. Así, se ha estimado que se alcanzará la convergencia cuando el valor de la detracción calculada para una iteración sea igual, o muy cercana, a la de la iteración anterior.

Adicionalmente, se introdujo un criterio de convergencia interno para asegurar que la simulación de los acuíferos se realizaba de forma adecuada, dado que a lo largo de la subrutina se realizan cambios en las afecciones del acuífero en diversos puntos. Por ello se emplazó a la subrutina a repetir el cálculo de simulación del acuífero siempre

que existieran cambios en las afecciones hasta que éstas fuesen idénticas respecto a las obtenidas en la iteración interna anterior.

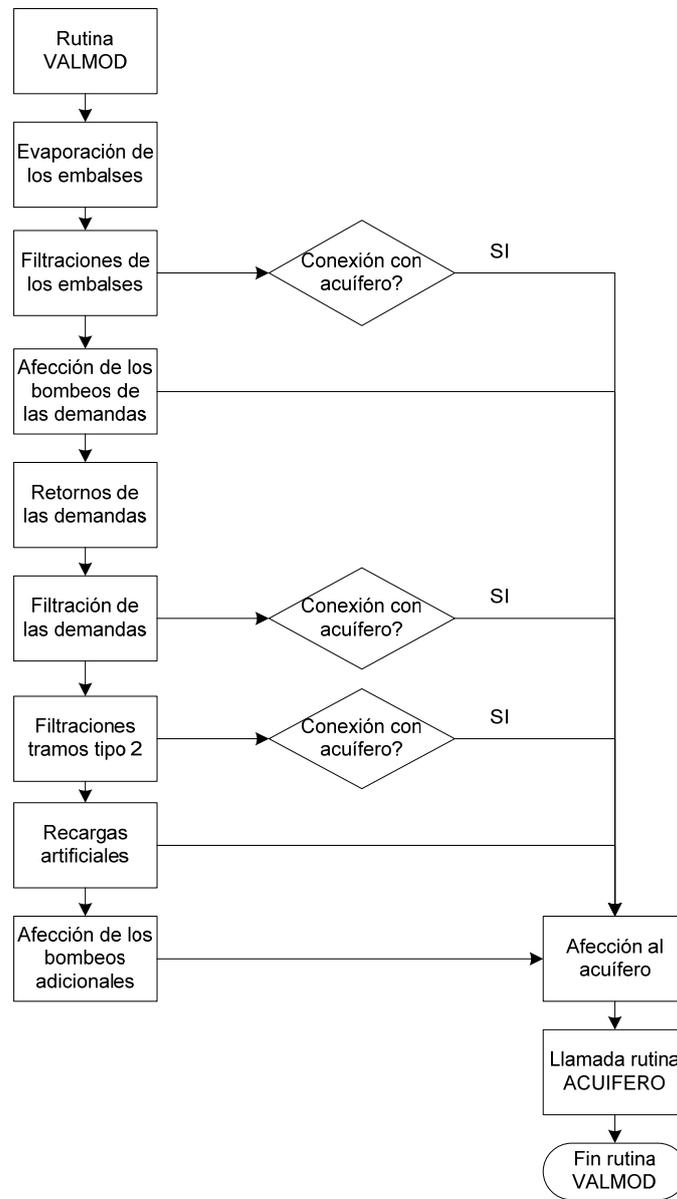


Figura 6.2. Diagrama de flujo de la rutina VALMOD con la incorporación de los acuíferos

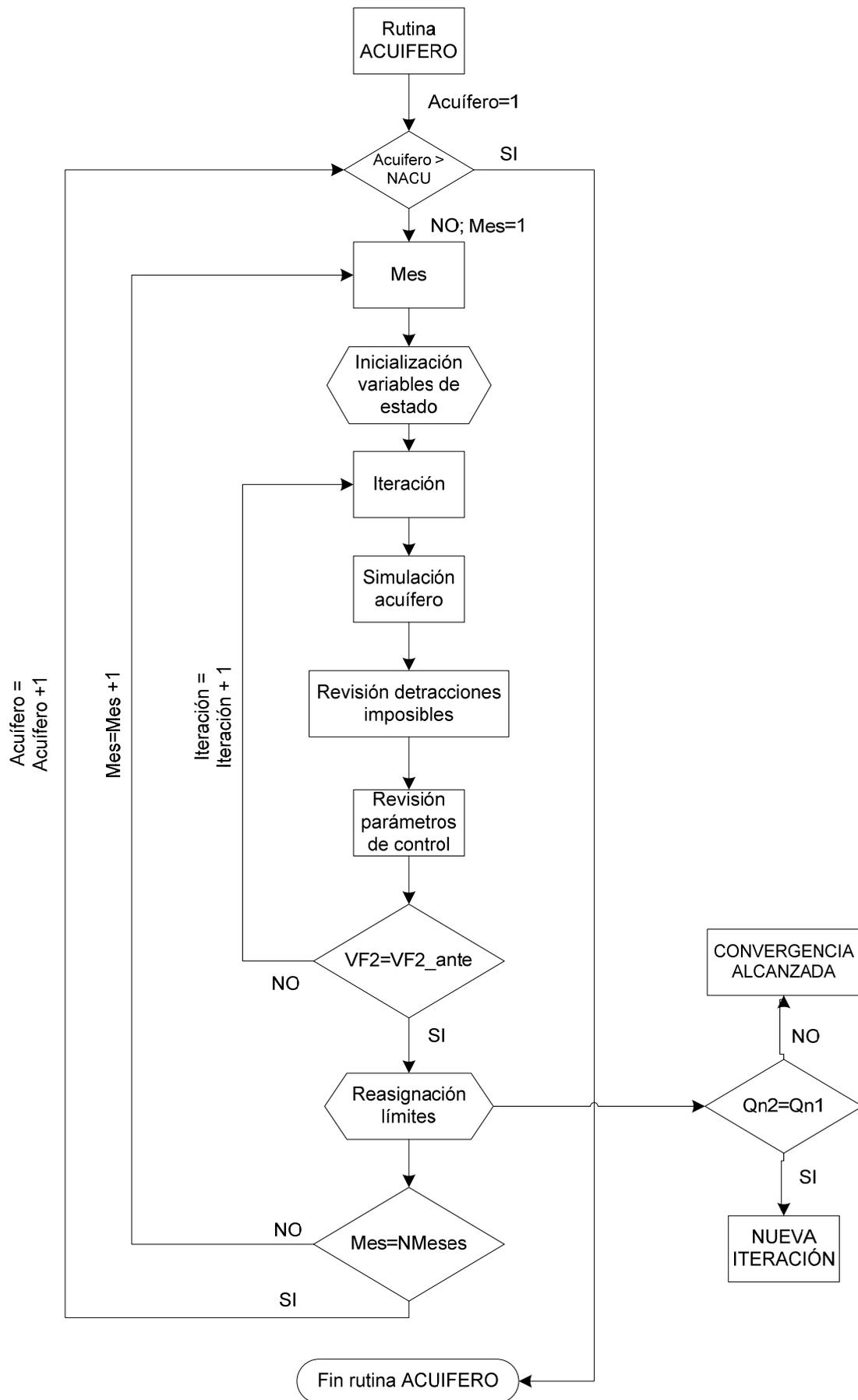


Figura 6.3. Diagrama de flujo de la nueva rutina ACUIFERO incluida en OPTIGES

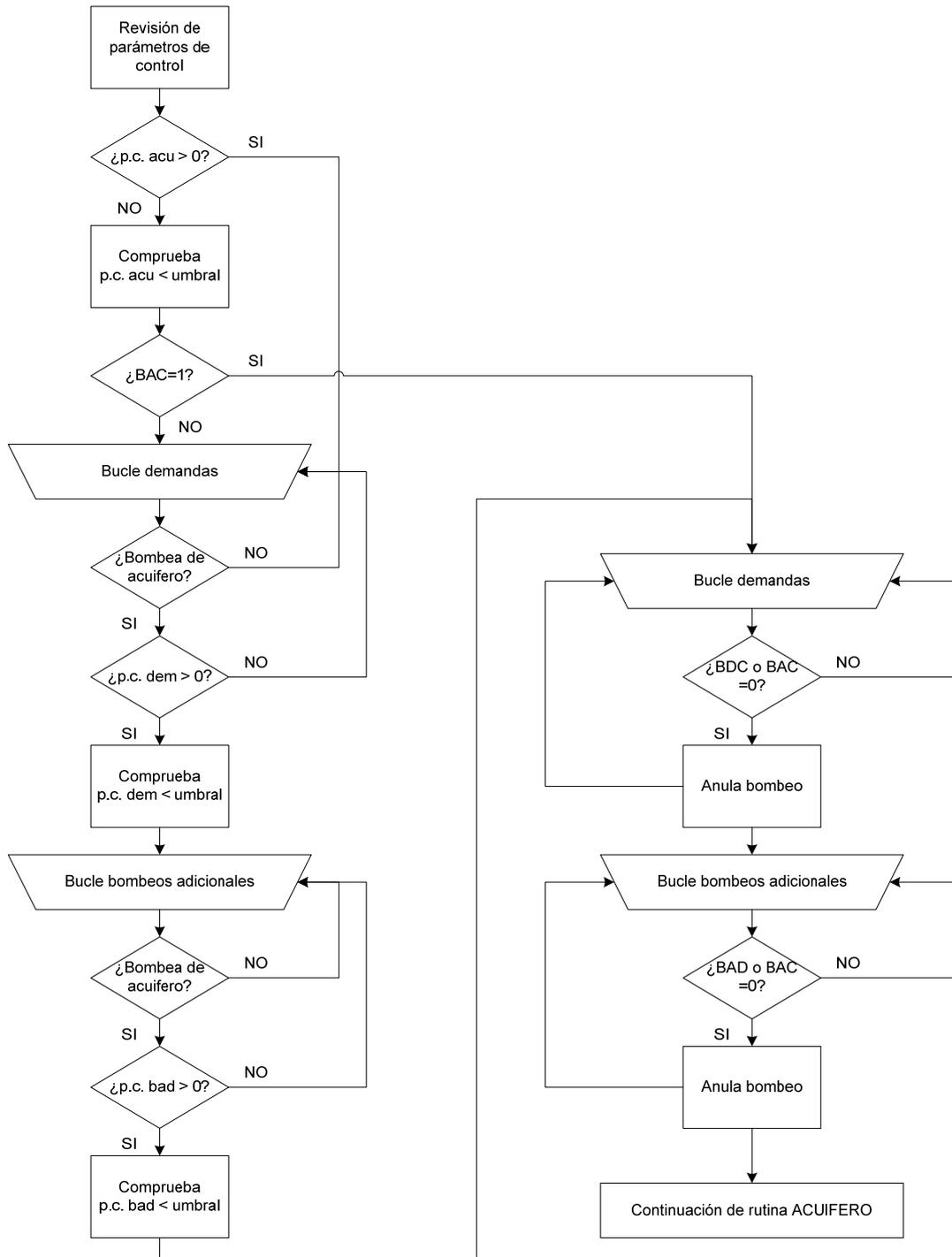


Figura 6.4. Diagrama de flujo correspondiente a la comprobación de los parámetros de control dentro de la rutina ACUIFERO

6.4. Otras subrutinas modificadas

Aparte de las rutinas nuevas o fuertemente modificadas dentro del modelo OPTIGES, también se han modificado la rutina de lectura de datos LEEDAT y lectura y escritura de resultados ESCRUIU.

6.5. Tests de funcionamiento. Aplicación a un caso sencillo

Una vez se han modificado todas las rutinas necesarias para el funcionamiento del programa resulta necesario comprobar su correcto funcionamiento en un modelo simple.

A lo largo de este apartado se muestran los resultados más significativos obtenidos para el caso empleado en la validación del funcionamiento del modelo. Se comprobaron resultados tanto relacionados con la gestión del sistema y su relación con el acuífero, como con el tiempo empleado en realizar los cálculos en un PC Intel® Core™ 2 Duo CPU E7400 @ 2.80 GHz 2.80 GHz y 1.74 Gb de RAM.

El caso empleado se corresponde, en base, con el ejercicio 4 de la publicación *“Ejemplos de sistemas de recursos hídricos resueltos con AQUATOOL”* (UPV 2010). En este ejemplo se desarrolla un modelo de utilización conjunta en un sistema cuya representación esquemática se muestra en la figura 5.5. Dicho sistema cuenta con un embalse, tres demandas con diferentes prioridades entre ellas y un acuífero del cual extrae agua la demanda agrícola y que está conectado a la parte baja del río. El acuífero se ha modelado como un acuífero unicelular.

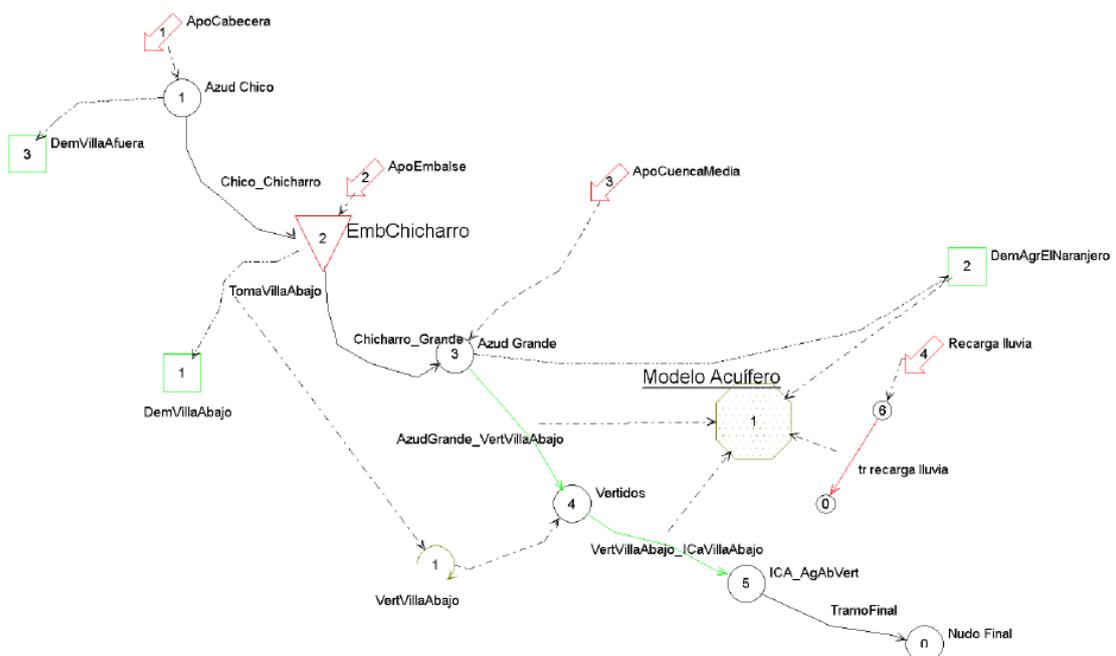


Figura 6.5. Esquema del sistema de recursos hídricos empleados en el caso de aplicación

El modelo no incluye todas las posibilidades incluidas actualmente en el modelo OPTIGES, pero sí que cuenta con los elementos más habituales de un modelo de utilización conjunta: tramos con filtraciones (en este caso representando la recarga de lluvia), bombeos de demanda y tramos conectados con el acuífero.

La tabla 5.1 muestra los valores mensuales de las demandas. La demanda de Villa Abajo (urbana) es prácticamente constante a lo largo del año y es la demanda más prioritaria de las tres. La demanda agrícola exige un mayor suministro en los meses de verano y, además, puede bombear hasta 10 Hm³/mes para complementar el suministro superficial. Por último, la demanda de Villa Afuera tiene una prioridad muy baja respecto a las dos anteriores suministrándose agua a la misma únicamente cuando existen sobrantes después de suministrar al resto del sistema y de almacenar agua en el embalse.

El periodo de optimización en todos los casos será de 60 años (720 meses) que se corresponde con la longitud de las series de aportaciones disponibles.

	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago
Villa												
Abajo	5.04	4.76	4.76	4.76	4.19	4.65	4.48	4.87	5.16	4.93	4.31	4.76
Demanda												
Agrícola	2.53	0.00	0.00	0.00	0.55	3.64	5.00	10.33	13.98	21.51	17.95	8.72
Villa												
Afuera	0.00	0.00	0.00	10.00	10.00	10.00	10.00	2.00	2.00	2.00	0.00	0.00
Demanda												
Total	7.56	4.76	4.76	14.76	14.74	18.29	19.49	17.20	21.14	28.44	22.27	13.48

Tabla 6.1. Valores mensuales de la demanda del caso de estudio

6.5.1. Test de funcionamiento 1. Comprobación de que la red de flujo no destina recursos a la recarga del acuífero a través de los tramos conectados al mismo.

El primer test que se plantea está íntimamente relacionado con el funcionamiento del algoritmo de resolución de la red de flujo generada para la optimización del sistema estudiado.

Pese a que el flujo a través de los arcos de conexión entre los tramos de tipo 3 y el acuífero está controlado desde el mismo inicio de la generación de la red, el alto coste asociado a dichos arcos podría hacernos sospechar de un funcionamiento errático del algoritmo, hecho que no debería ocurrir pero que no está de más comprobar.

Para ello se modificó el sistema eliminando las aportaciones de la cuenca media y los retornos de la demanda urbana para evitar que los flujos correspondientes a los

mismos enmascarasen posibles sueltas del embalse para algo más que para suministrar a las demandas. El sistema modificado se puede observar en la figura 5.6 que no difiere demasiado del original de la figura 5.5.

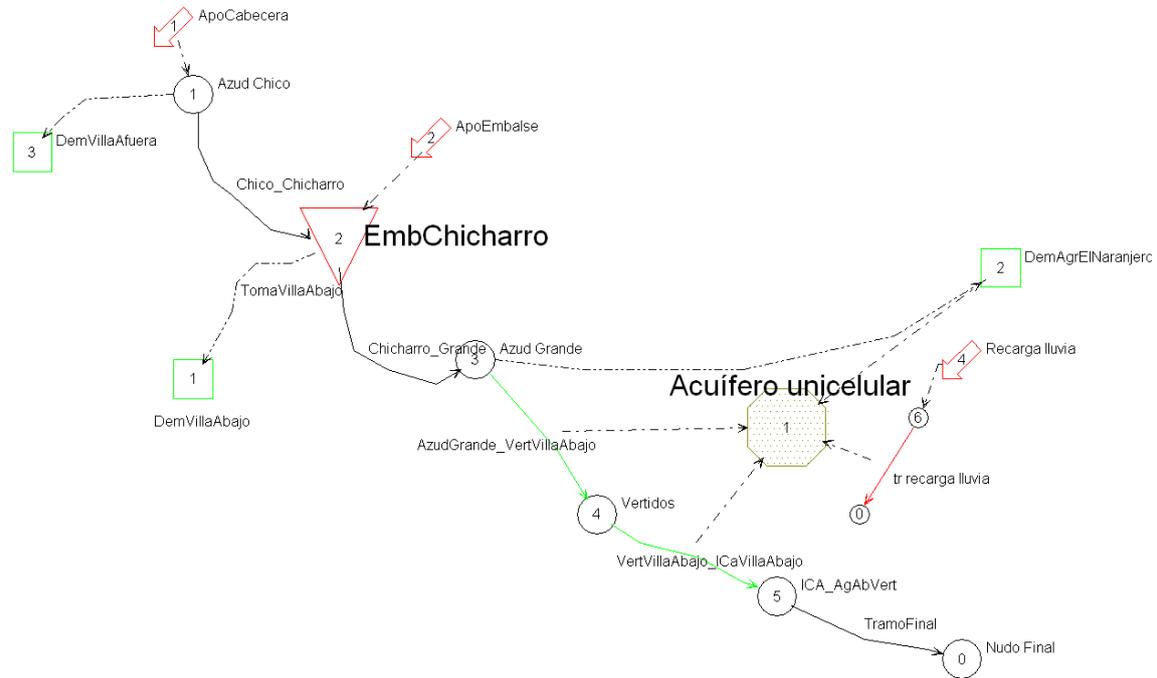


Figura 6.6. Esquema del sistema modificado

Para comprobar el funcionamiento del acuífero se realizaron cuatro optimizaciones cambiando el nivel de demanda de suministro mediante bombeo a la demanda agrícola. No se definieron parámetros de control de forma que el bombeo pudiera realizarse en cualquier momento que fuera necesario.

En la figura 5.7 se muestran cuatro gráficos que demuestran que la gestión que el modelo de optimización no realiza sueltas desde el embalse para la recarga del acuífero. Así, en la gráfica superior izquierda se tienen las sueltas del embalse, que se corresponden con el flujo a través del tramo entre el nudo embalse y el nudo 3. A la derecha del anterior se muestra el suministro superficial a la demanda agrícola a través de la toma en el nudo 3. La gráfica inferior izquierda muestra el caudal entrante al tramo de tipo 3 entre los nudos 3 y 4 junto a la diferencia entre los caudales mostrados en las dos gráficas superiores. Por último, en la gráfica de abajo a la derecha se muestra el volumen detráído del río hacia el acuífero. Todos los gráficos mostrados se corresponden con los resultados de la optimización en la que el bombeo a la demanda agrícola permite suministrar cualquier nivel de la misma, lo que implica un bombeo mayor y, por tanto, una afección muy importante al acuífero.

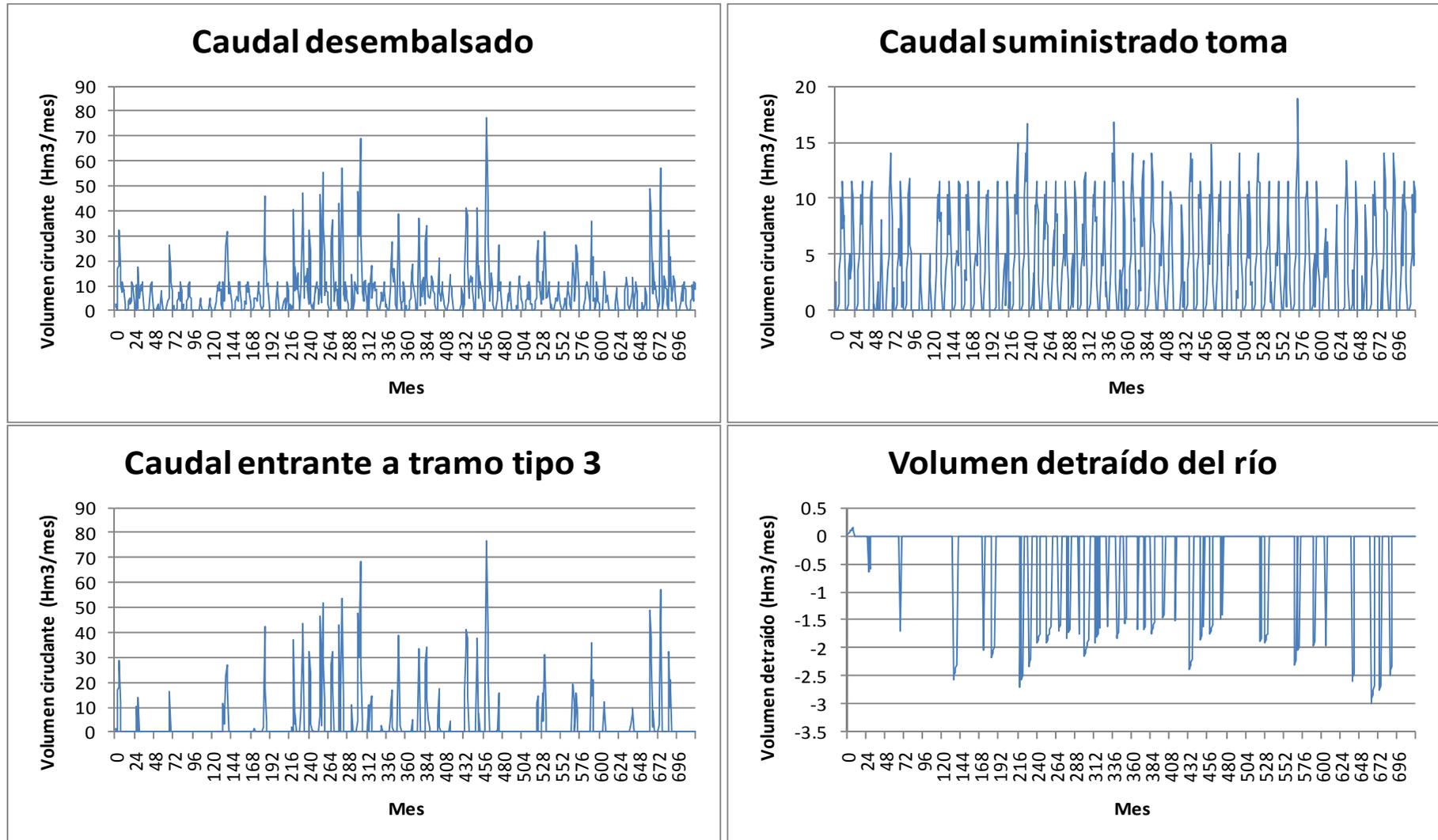


Figura 6.7. Resultados de caudales entre el embalse y el acuífero para un nivel de bombeo igual a 4

Como puede apreciarse, sólo ocurren desembalses para bien suministrar a la demanda agrícola de forma superficial, o bien cuando el embalse ya se encuentra a su nivel máximo y no puede almacenar más agua. Es sólo en estos últimos casos cuando entra agua al tramo tipo 3 y, por consiguiente, cuando tiene lugar la detracción de parte de dicho caudal hacia el acuífero.

En el anejo 3 se recopilan los resultados más significativos de las cuatro optimizaciones realizadas. Tal como se verá en el próximo apartado, permitir que se empleen los bombeos para suplir un mayor nivel de la demanda agrícola tiene un efecto positivo para todas las demandas, ya que quedan más recursos superficiales disponibles para suministrar a las demandas urbanas, mientras que el nivel del acuífero se ve más severamente afectado.

6.5.2. Test de funcionamiento 2. Funcionamiento del modelo y comportamiento del acuífero en un sistema completo sin limitación de los bombeos por parámetros de control.

Se pasa a continuación a emplear el sistema completo, cuyo esquema se muestra en la figura 5.6, para realizar el resto de test de funcionamiento. En este caso se desea comprobar qué ocurre con el acuífero en el modelo de optimización y qué diferencias existen entre los resultados obtenidos por éste y los que nos aporta el modelo de simulación empleado para calcular internamente los parámetros de control. De nuevo, se permitirá que los bombeos tengan lugar sea cual sea el estado del acuífero.

En la figura 5.8, en la página siguiente, se observa que, según el nivel de demanda que cubra el bombeo, la coincidencia entre el estado del acuífero obtenido a partir de la resolución de la red de flujo y el obtenido mediante la simulación a partir de las afecciones que tienen lugar sobre él es cada vez menor. Esto se explica al observar los gráficos de la figura 5.9, que representan los caudales correspondientes a la relación río acuífero. En esta última figura se observa que, en diversas ocasiones, tienen lugar detracciones imposibles en los tramos de tipo 3, lo que implica que parte del agua demandada por el acuífero en el modelo de simulación nunca llegará al mismo con las condiciones de flujo del modelo de optimización (hay que puntualizar que las ecuaciones que gobiernan el modelo de acuífero uni o pluricelular siempre consideran una situación ideal en la que el río siempre aporta el flujo suficiente hacia el acuífero). Aunque la subrutina ACUIFERO corrige las detracciones imposibles introduciendo una afección extra sobre el acuífero igual a la cantidad no satisfecha de la detracción del río, cuanto mayor número de detracciones imposibles existan, menor será la coincidencia entre los resultados de simulación y optimización. Esto, por supuesto, no significa que los resultados obtenidos del modelo de optimización sean erróneos o menos adecuados, simplemente son los que tienen que ser dadas las condiciones de flujo reales del sistema.

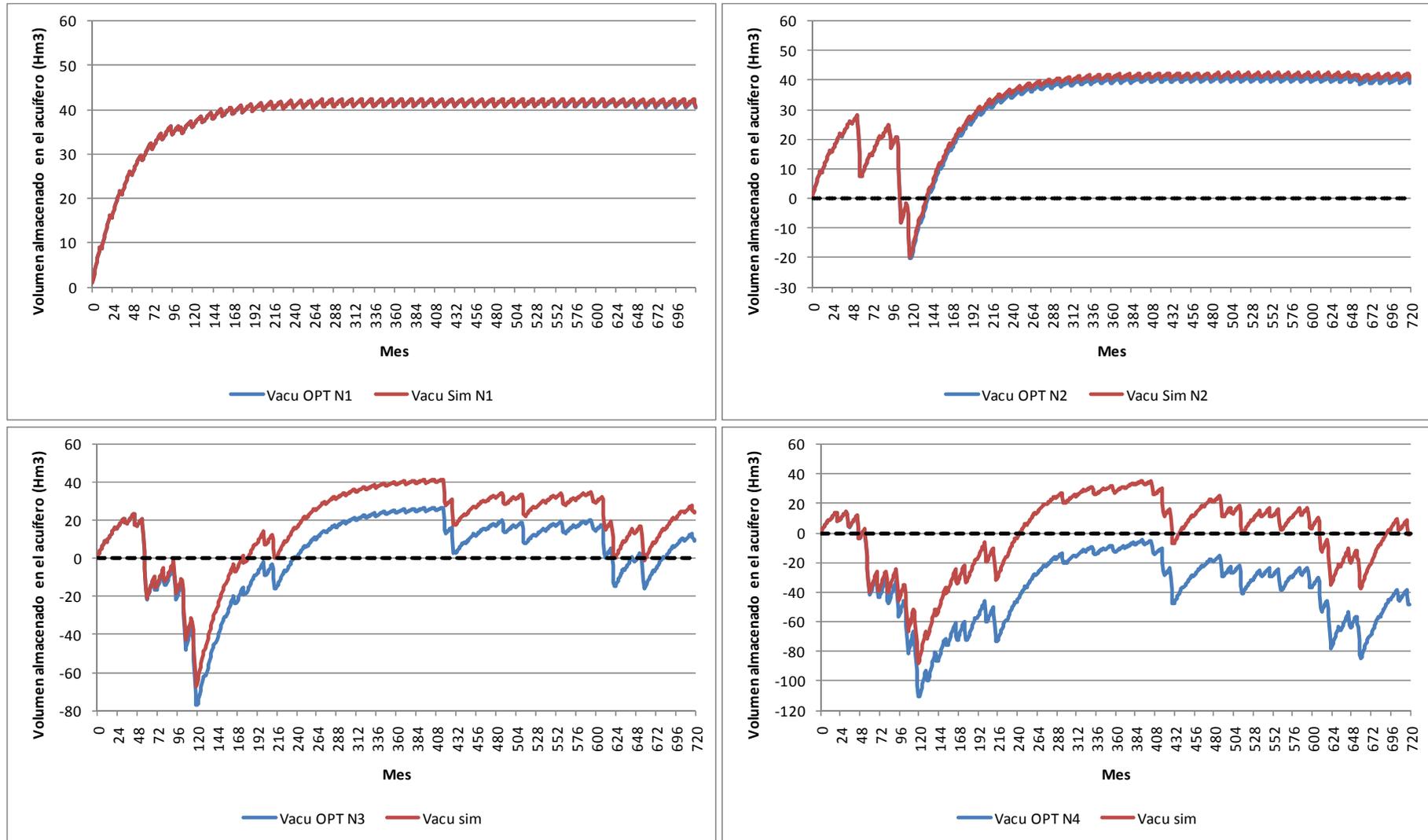


Figura 6.8. Evolución del volumen del acuífero calculado a partir de la red de flujo para cada uno de los niveles de bombeo permitidos comparado con los resultados de simulación

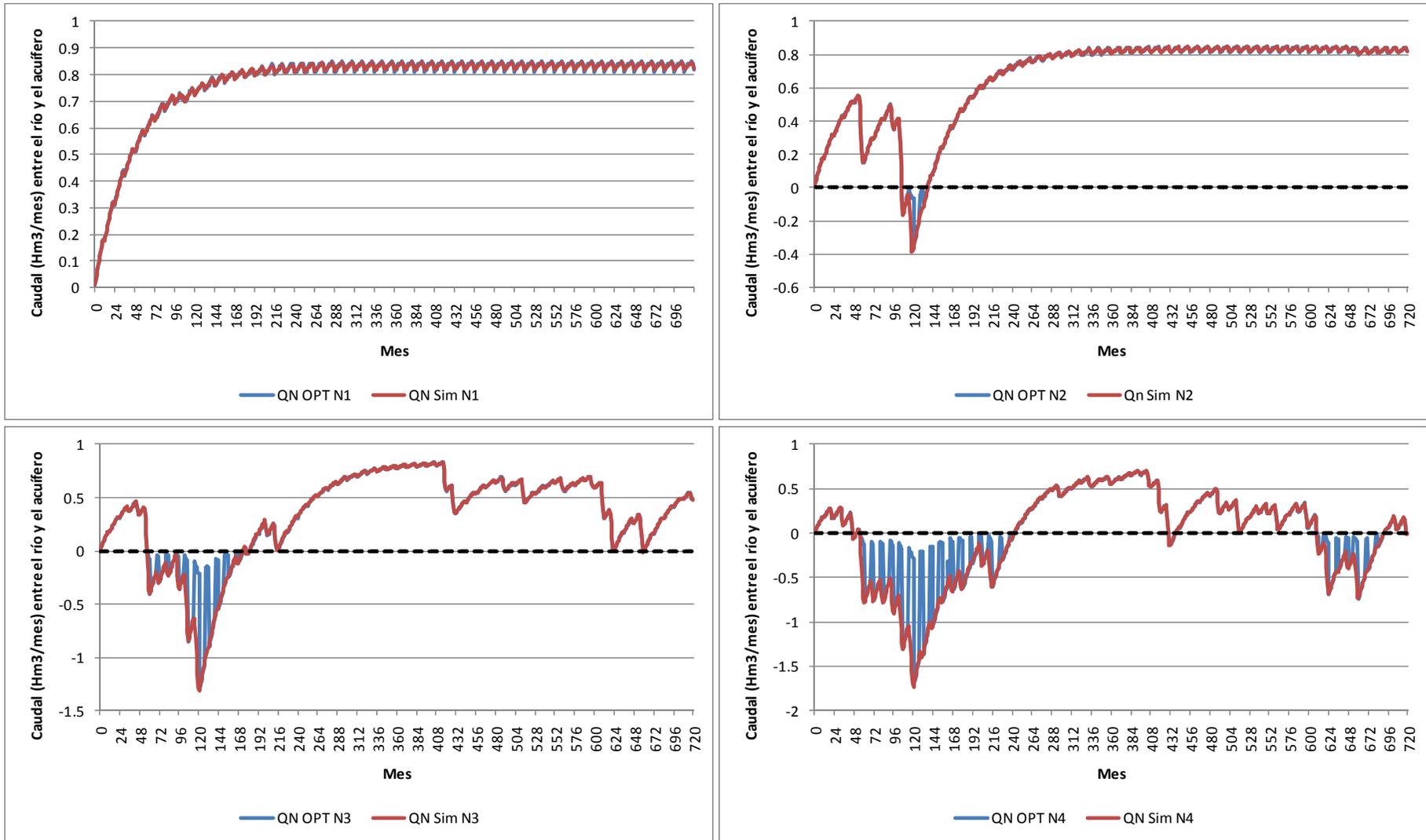


Figura 6.9. Caudal entre río y acuífero, calculado (azul) y demandado (rojo), para cada uno de los 4 niveles de bombeo permitidos

Dado que el objetivo de introducir la consideración de acuíferos en el modelo OPTIGES es ganar profundidad en el estudio de los sistemas de recursos hídricos y permitir estudios de optimización que incluyan la utilización conjunta de las aguas superficiales y subterráneas, a continuación nos fijaremos en cómo se ven afectados los déficits del esquema que se está empleando.

El caso en que el nivel de demanda agrícola que puede cubrirse mediante bombeo es el 50% de la misma, es decir, el primer nivel, puede considerarse como el caso de referencia en que sólo se emplean las aguas superficiales para suministrar todas las demandas del sistema ya que apenas se hace uso de los bombeos al ser suficiente con el suministro superficial para suministrar la mitad de la demanda (figura IV.1).

Estudiando, entonces, el primer caso, se observa que existen déficits importantes en el sistema y que no se cumplen los criterios de garantía ni para la demanda agrícola ni para las demandas urbanas (ver figuras IV.3 a IV.5 y tabla 5.2).

Demanda Agrícola

Criterio 1 año		Criterio 2 años		Criterio 10 años	
Nº Fallos	%	Nº Fallos	%	Nº Fallos	%
0	100	1	98.33	18	70

CRITERIO GARANTÍA IPH-08: NO CUMPLE

Demanda Villa Abajo (Urbana)

Criterio Mensual		Criterio 10 años	
Nº Fallos	%	Nº Fallos	%
126	82.5	44	13.73

CRITERIO GARANTÍA IPH-08: NO CUMPLE

Demanda Villa Afuera (Urbana)

Criterio Mensual		Criterio 10 años	
Nº Fallos	%	Nº Fallos	%
202	71.94	51	0

CRITERIO GARANTÍA IPH-08: NO CUMPLE

Tabla 6.2. Garantías asociadas a las diferentes demandas del sistema para un nivel de bombeos que cubre hasta el 50% de la demanda agrícola

Analizando el sistema se pueden identificar como responsables de estos déficits, que no escasez de recursos, dos causas diferenciadas. En primer lugar, y casi la más importante por así decirlo, la deslocalización temporal de recurso y demanda. En la figura 5.10 se muestran desagregadas tanto las aportaciones que entran al sistema como las demandas en media mensual. Se puede observar como la cantidad de recurso resulta más que suficiente para suministrar toda la demanda superficialmente. Desgraciadamente, el grueso de dicho recurso se corresponde con la aportación proveniente de la cuenca media, cuya carencia de algún elemento regulador hace que se pierda una gran parte del mismo de cara a las carencias evidentes en los meses de

verano, cuando la demanda agrícola demanda unos recursos que en la mayoría de las ocasiones no se van a poseer.

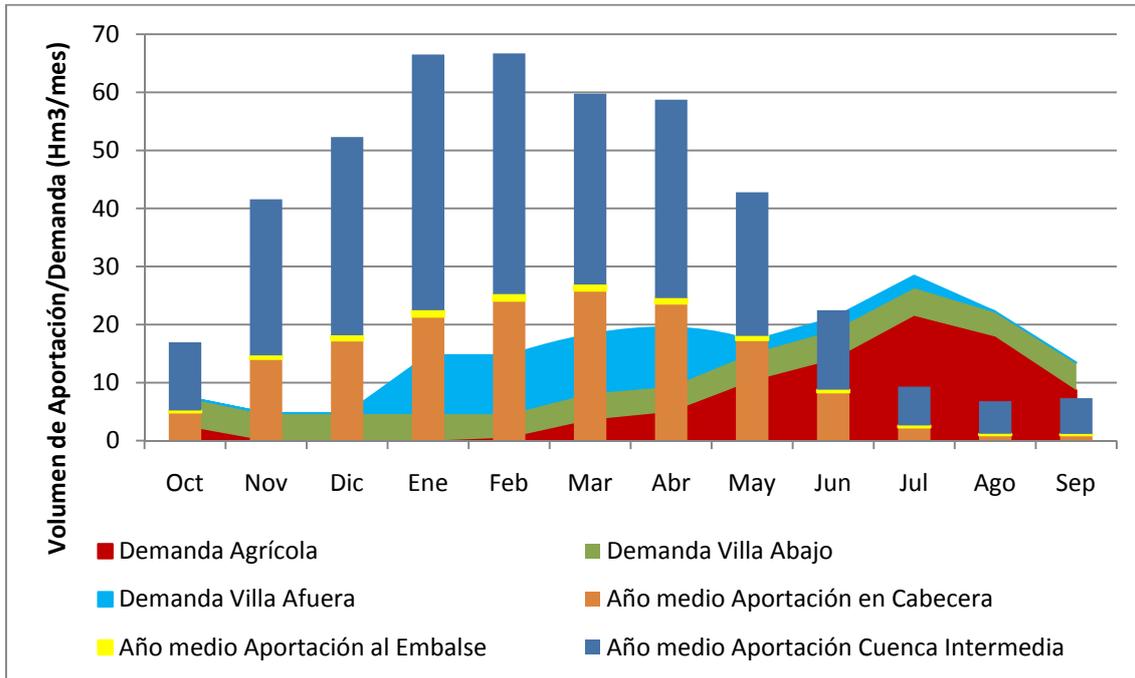


Figura 6.10. Aportación mensual media en la cuenca desagregada durante los 60 años del periodo de optimización frente a la demanda total desagregada

La segunda causa es, como en muchos sistemas reales, la sequía. Observando los gráficos IV.3 a IV.5 en el anejo 4 de esta tesina se aprecia que existe, principalmente, un periodo de sequía durante los primeros 15 años, durante los cuales la aportación es relativamente reducida (ver figuras IV.21 a IV.24 de aportaciones en la cuenca).

Es, por tanto, interesante, plantear la posibilidad de la utilización conjunta de recursos superficiales y subterráneos para paliar las necesidades del sistema. Dado que estamos tratando un caso en que no existe, a priori, limitación a los bombeos, permitir que una mayor parte de la demanda agrícola pueda suministrarse de forma subterránea supone una opción sencilla de realizar.

Si el nivel de demanda suministrado por el bombeo se incrementa a 2, o lo que es lo mismo, a cubrir el 70% de la demanda agrícola, se aprecia una mejoría en las garantías, pero aún así, no se llegan a cumplir los criterios impuestos por la IPH-08.

Si el nivel de demanda suministrado se incrementa hasta el 90% de la demanda agrícola, ésta pasa a cumplir el criterio de la IPH-08, no ocurre así con las demandas urbanas, pero los déficits en estas se ven notablemente reducidos (ver tabla 5.3 y figuras IV.13 a IV.15).

Demanda Agrícola

Criterio 1 año		Criterio 2 años		Criterio 10 años	
Nº Fallos	%	Nº Fallos	%	Nº Fallos	%
0	100	0	100	0	100

CRITERIO GARANTÍA IPH-08: **CUMPLE**

Demanda Villa Abajo (Urbana)

Criterio Mensual		Criterio 10 años	
Nº Fallos	%	Nº Fallos	%
107	85.14	43	15.69

CRITERIO GARANTÍA IPH-08: **NO CUMPLE**

Demanda Villa Afuera (Urbana)

Criterio Mensual		Criterio 10 años	
Nº Fallos	%	Nº Fallos	%
202	71.94	51	0

CRITERIO GARANTÍA IPH-08: **NO CUMPLE**

Tabla 6.3. Garantías asociadas a las diferentes demandas del sistema para un nivel de bombeos que cubre hasta el 90% de la demanda agrícola

Finalmente, incrementar el nivel de suministro al 100% no supone un cambio significativo respecto de la situación en el nivel anterior salvo que las afecciones del acuífero son mayores y, por tanto, se dan mayores descensos en el mismo, lo que, generalmente, no es recomendable.

6.5.3. Test de funcionamiento 3. Control de los bombeos mediante parámetros de control

En el apartado anterior se ha comprobado el funcionamiento de la subrutina ACUIFERO y se ha realizado un análisis sencillo de la posibilidad de la utilización de los bombeos para mejorar el suministro en el sistema. A continuación se avanza un paso más en la comprobación del funcionamiento de la nueva subrutina, y de las posibilidades de la utilización de aguas superficiales y subterráneas en el sistema de ejemplo estudiado, agregando un elemento limitante a los bombeos.

Se decide limitar, o paralizar, los bombeos cuando las condiciones del acuífero o de la relación entre éste y el río alcanzan un determinado límite, generalmente impuesto por necesidades físicas y/o ambientales. A estas limitaciones se les denomina parámetros de control. Se pueden definir parámetros de control tanto en acuíferos como en bombeos. En OPTIGES, el parámetro de control en cualquiera de estos dos elementos se define por su número y por el umbral, un valor de dicho parámetro por debajo del cual se detienen los bombeos.

Para comprobar el funcionamiento de la parte de parámetros de control de la subrutina ACUIFERO y, a la vez, continuar con el análisis de utilización conjunta del sistema, se planteará encontrar el valor del parámetro de control para el cual se puede

seguir cumpliendo el criterio de garantía de la demanda agrícola al 100%. Así, se partirá del caso en que se detuvo el apartado anterior, esto es, haciendo que el bombeo pueda suministrar la demanda agrícola hasta el 90%.

En el caso de partida, el volumen del acuífero alcanza prácticamente -80 Hm^3 , como puede verse en la gráfica inferior izquierda de la figura 5.8.

Podría considerarse que alcanzar volúmenes tan bajos en el acuífero puede no resultar adecuado por motivos medioambientales, como por ejemplo la salinización del mismo, o una detracción muy alta del caudal de los ríos a los que esté conectado afectando los caudales ecológicos de los mismos. Por tanto, es de recibo limitar los bombeos de forma que el volumen en el acuífero no llegue a cotas tan bajas. Sin embargo, hay que tener en cuenta que existen unas garantías en las demandas que deberían mantenerse, por lo que habrá que encontrar un equilibrio entre ambas partes.

Se realizó una serie de pruebas en la que se definió el volumen almacenado en el acuífero como parámetro de control y se disminuyó el umbral del mismo de forma progresiva. De esta forma se obtuvo que para un umbral de -45 Hm^3 se siguieran cumpliendo las garantías de la demanda agraria. Así, como se muestra en la figura 5.11, se logra aumentar los volúmenes disponibles en el acuífero respecto a la situación de partida, sin afectar en exceso a las garantías de la demanda agraria (ver figura 5.12).

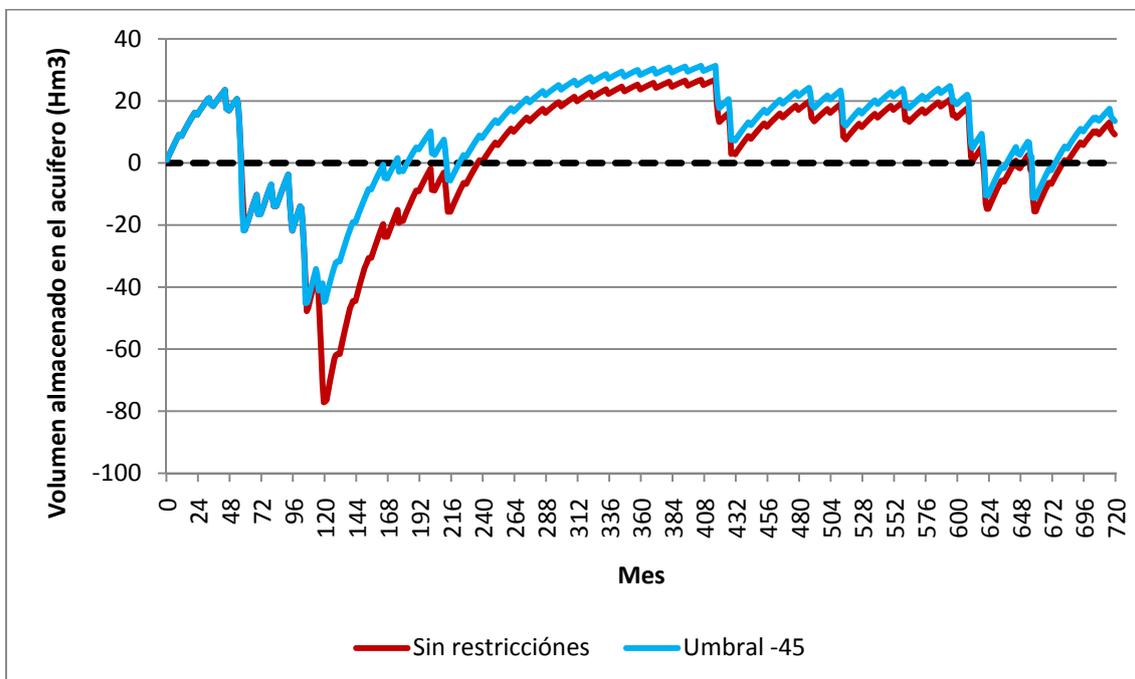


Figura 6.11. Evolución del volumen en el acuífero para la situación en que el bombeo cubre hasta el 90% de la demanda agrícola y no existen limitaciones sobre el mismo.

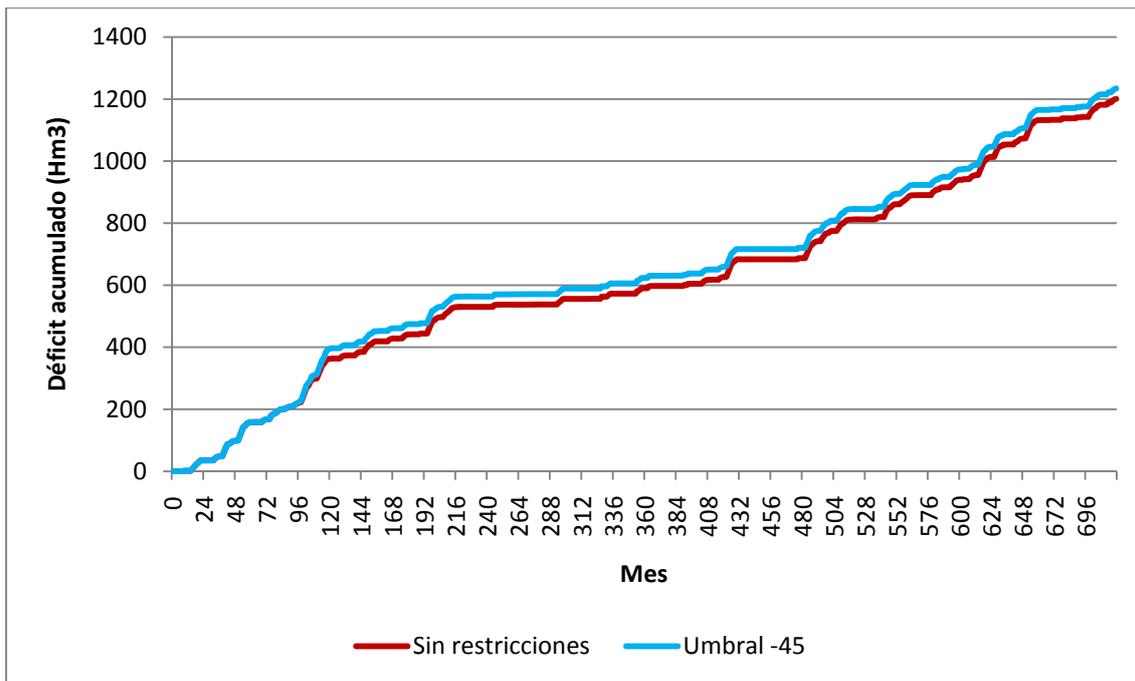


Figura 6.12. Déficit acumulado para el caso en que no existen limitaciones a los bombeos y cuando se impide bombear por debajo de -45 Hm3

6.6. Tiempo de cálculo y convergencia de los resultados

Hasta ahora se ha hablado de los resultados obtenidos gracias a la nueva subrutina ACUIFERO integrada en la herramienta OPTIGES. Esta nueva incorporación al proceso de cálculo implica, inevitablemente, un incremento del tiempo de ejecución del programa que habrá de tenerse en cuenta cuando vayan a analizarse sistemas mucho mayores al hasta ahora presentado.

Ya se vio en el capítulo anterior como el nuevo algoritmo de cálculo incorporado a la herramienta OPTIGES permite reducir el tiempo de ejecución de la herramienta OPTIGES en hasta dos órdenes de magnitud. En este capítulo se han realizado pruebas con dos sistemas distintos, el simplificado y el completo, con unas redes de flujo asociadas con tamaños distintos que pueden consultarse en la tabla 5.4. Puede observarse que no son muy diferentes una de la otra pero sí que son redes bastante más grandes que las empleadas en el capítulo anterior.

	Tamaño de la red de flujo	
	Número de nudos	Número de arcos
Sistema simplificado	10092	28098
Sistema completo	10094	29540

Tabla 6.4. Tamaño de la red de flujo asociada a los dos esquemas de recursos hídricos empleados en este capítulo

Dado que ambos sistemas son muy similares, se presentarán los resultados relativos al tiempo de ejecución del sistema completo. Como se ha comentado, se realizaron cuatro pruebas diferentes según el nivel de demanda que podría suministrarse mediante bombeo a la demanda agrícola sin limitaciones de ningún tipo. De estas pruebas se extrajeron los tiempos de cálculo de cada iteración por separado y del tiempo de ejecución global. Se puede observar en la figura 5.13 cómo el tiempo de resolución apenas supera los 2.5s en el peor de los casos que, a su vez, se corresponde con el caso relativamente más complejo (nivel de suministro del 100% de la demanda agrícola), ya que el número de arcos a través de los cuales hay circulación de flujo es mayor. El tiempo de ejecución individual de cada iteración no superó los 0.45s en ninguno de los cuatro casos.

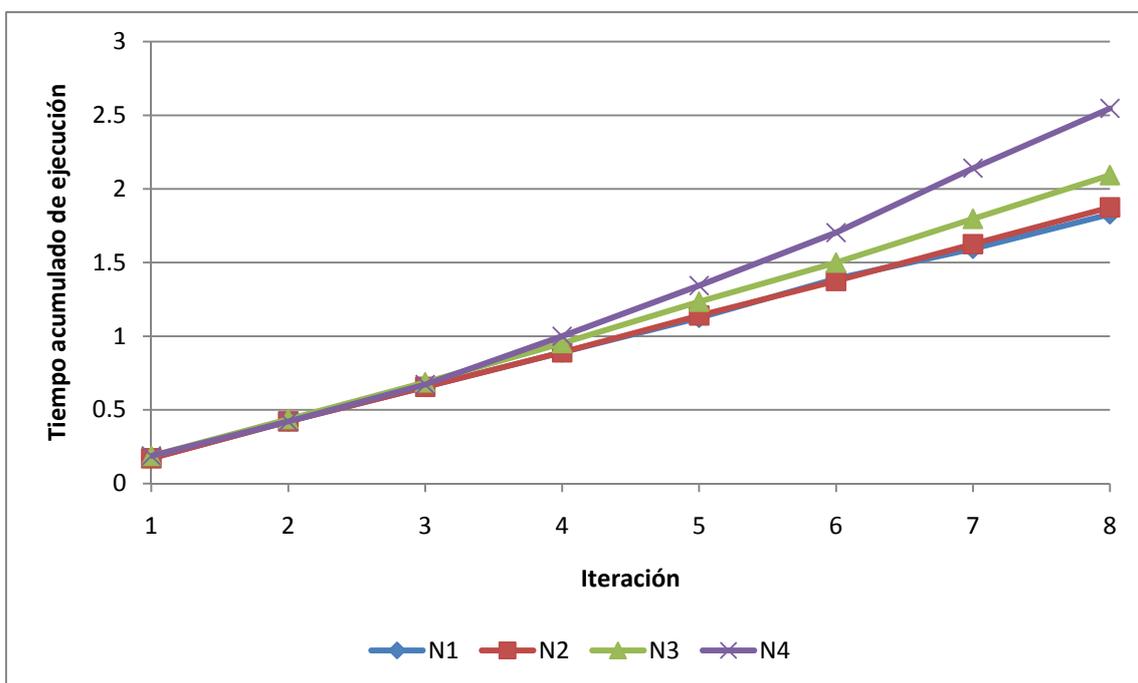


Figura 6.13. Tiempo de ejecución acumulado para cada uno de las pruebas realizadas con el sistema de recursos simplificado, correspondiéndose N1 con el primer nivel de demanda y así sucesivamente

Posteriormente se introdujo la limitación de bombeos en el proceso de cálculo. Se observa que el tiempo de ejecución de cada iteración se mantiene aproximadamente constante independientemente del umbral que se haya escogido. Así se tiene que, en las primeras iteraciones el tiempo de cálculo es menor debido a la mayor sencillez de la red, ya que muchos arcos tienen asignado un flujo nulo y que incrementa según se van añadiendo no linealidades al proceso de cálculo. En la figura 5.14 se observa cómo el tiempo de cálculo no varía demasiado a excepción de si se realiza alguna iteración más por razones de convergencia.

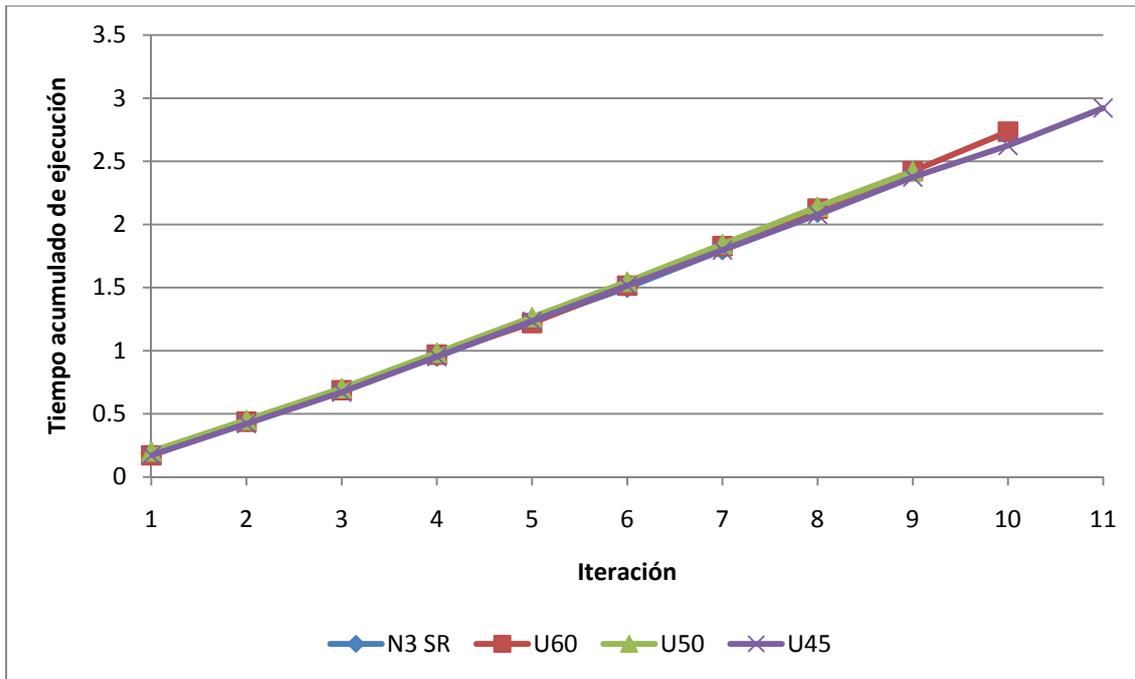


Figura 6.14. Tiempo de ejecución de la herramienta OPTIGES para diferentes valores de umbral (sin umbral, -60 Hm3, -50 Hm3 y -45 Hm3) para un nivel de bombeo capaz de suministrar hasta el 90% de la demanda agrícola

Respecto a la convergencia de los resultados, a diferencia del capítulo anterior, no se han experimentado casos en que el proceso de cálculo no haya convergido rápidamente, más teniendo en cuenta que se fuerza al programa a realizar 8 iteraciones antes de realizar la comprobación de convergencia. Esto no quita que se pueda dar algún caso en que se alcance el máximo número de iteraciones sin llegar a la convergencia de los cálculos. Este hecho refuerza la hipótesis realizada en el anterior capítulo en que se estableció que la convergencia de los cálculos puede no depender exclusivamente del método seguido sino también del sistema que se esté estudiando y, por ello, habrá que estudiar, en un futuro, la forma de ligar los criterios de convergencia al modelo de sistema que se vaya a analizar.

6.7. Consideraciones finales del capítulo 6

Se ha desarrollado un módulo adicional para un modelo de optimización de esquemas de recursos hídricos de modo que, a partir de ahora, pueda plantearse la elaboración de modelos de optimización de recursos hídricos en que se introduzca la utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas. Este módulo se incluirá, tras su completo testeo, dentro de futuras versiones del modelo OPTIGES.

De momento se han integrado exclusivamente dos modelos de acuífero sencillos como son los uni y pluricelulares. En futuros desarrollos de la herramienta se introducirán más modelos de acuíferos hasta igualar los contenidos por la herramienta SIMGES.

Otro aspecto que se ha desarrollado pero que requerirá un mayor desarrollo posterior es el control de bombeos. De momento se ha establecido que si el estado del acuífero

o del caudal al río está por debajo de un umbral establecido previamente por el usuario el bombeo se anula por completo. Sin embargo, resultaría muy provechoso darle al usuario la oportunidad de decidir si desea interrumpir drásticamente los bombeos o, por el contrario, reducirlos progresivamente hasta que se cumpla con el parámetro de control. Haciendo esto podrían optimizarse los bombeos y definir reglas de utilización de los mismos mucho más específicas.

Resta comentar que las pruebas que se han realizado del nuevo módulo han resultado sin duda satisfactorias dado que los resultados obtenidos se encuadran dentro de los resultados esperables. Se confía, por tanto, en que la aplicación de la herramienta a esquemas de recursos hídricos basados en sistemas reales produzca resultados adecuados para su empleo regular en el desarrollo de nuevas políticas de gestión de los mismos.

7. Conclusiones

Esta tesina de máster ha tratado la optimización de esquemas de recursos hídricos con una visión descendente. Se ha realizado, en primer lugar, un estudio del estado del arte acerca de las técnicas de optimización que se emplean actualmente en el campo de la gestión de recursos hidráulicos. Nos encontramos con que nuestra especialidad es uno de los campos en los que más técnicas diferentes se han empleado y, muy probablemente, se emplearán debido a la variada casuística que puede darse y a la gran importancia que se da a los recursos hidráulicos por su creciente escasez.

Se expuesto el problema del reparto de recursos hídricos dentro de una cuenca, el denominado “water allocation problema” en la literatura anglosajona. Este problema, que, como su propio nombre indica, busca obtener el mejor reparto del recurso entre los diferentes usos de un sistema, se enfoca habitualmente desde el punto de vista de la optimización y dado que el tamaño y complejidad de los sistemas a optimizar es alto, se tiende a emplear modelos que permitan definir el sistema de manera esquemática y resolver el problema mediante una de las técnicas de optimización existentes.

Dado que el interés principal perseguido en esta tesina es la mejora y ampliación del modelo OPTIGES, un modelo basado en la resolución óptima de redes de flujo, se ha continuado el desarrollo de este texto centrándose en el empleo de esta técnica. Dado que la resolución de redes de flujo es una metodología bien fundamentada desde hace décadas, existe un amplio abanico de algoritmos disponibles para su empleo. De todos ellos existían dos, aparte del que se utiliza en la actualidad, que podían ser empleados para la resolución de las redes de flujo generadas por la herramienta OPTIGES con algunas pequeñas adaptaciones.

Por lo tanto, se crearon tres versiones del modelo funcionando cada una con uno de los algoritmos como motor de cálculo y se compararon sus resultados entre sí. De estas comparaciones se obtuvo que el algoritmo RELAX-IV (Bersetkas 1994) es capaz de resolver los esquemas generados con el modelo OPTIGES de una forma mucho más eficiente que el algoritmo que se estaba empleando hasta ahora, llegando a ser hasta dos órdenes de magnitud más rápido que su predecesor.

El nuevo algoritmo abre pues un nuevo abanico de posibilidades para la inclusión de nuevas capacidades al modelo OPTIGES que, hasta el momento, se habían visto coartadas por el excesivo consumo de recursos que exigía la herramienta funcionando bajo el anterior algoritmo. De entre las nuevas posibilidades destaca la incorporación de nuevos elementos del sistema de recursos hídricos con comportamiento no lineal. Al ser las redes de flujo una forma eficiente de la programación lineal, el tratamiento de las no linealidades se aproxima de forma iterativa. Cuanto más complejas sean

dichas no linealidades, mayor número de iteraciones deberá realizar el programa. Es por ello que la utilización de un nuevo algoritmo más rápido para la resolución de la red de flujo permitirá realizar un mayor número de iteraciones en menos tiempo, lo que permite plantearse la inclusión de aspectos no lineales complejos, como los acuíferos, las centrales hidroeléctricas o el tiempo de viaje del flujo a través del sistema.

Uno de los aspectos novedosos que se plantean con la inclusión del nuevo algoritmo es la incorporación de acuíferos a los modelos de optimización de los esquemas de recursos hídricos de OPTIGES. Así, se ha desarrollado un nuevo módulo para la herramienta que ha demostrado un funcionamiento adecuado en las diversas pruebas que del mismo se han realizado. Por supuesto, las pruebas realizadas no reflejan todas posibilidades que podrían darse en un sistema real pero ofrecen unos resultados muy satisfactorios que hacen pensar que su funcionamiento en casos más complejos también será adecuado.

De forma paralela a los desarrollos de la herramienta OPTIGES se ha estudiado la forma en que se estima la convergencia de las iteraciones. Se ha observado que el criterio de convergencia aparenta estar muy ligado al sistema que se esté estudiando en cada momento y que, por tanto, sería recomendable comenzar, de ahora en adelante, a definir el criterio de convergencia en base a un estudio del sistema. Ahora bien, la forma de ligar el sistema con el criterio de convergencia es un aspecto que se deja para futuras investigaciones.

Como conclusión general de esta tesina puede decirse que se ha cumplido con los objetivos impuestos al inicio de la misma. La nueva versión de la herramienta OPTIGES supone un avance evidente frente a la versión existente antes de iniciarse los trabajos que han finalizado con la redacción de este texto. Por supuesto, queda pendiente la aplicación práctica de la nueva versión de la herramienta para la obtención de políticas óptimas de gestión de cuencas reales, aspecto que se desarrollará en futuras investigaciones y/o estudios.

Para finalizar, se establecen algunas líneas futuras de investigación y de trabajo a seguir tomando como base los avances logrados con esta tesina, muchos de los cuales ya se han comentado o se pueden intuir de la lectura de esta memoria:

- Puesta en práctica de la nueva versión de OPTIGES para la elaboración de estrategias óptimas de gestión en cuencas reales.
- Desarrollo en profundidad de la subrutina ACUIFERO, introduciendo nuevos modelos de acuíferos.
- Introducción de la posibilidad de disminuir progresivamente los bombeos en lugar de detenerlos cuando se sobrepasa el valor umbral en la comprobación de los parámetros de control.

- Adaptación de la interfaz gráfica de AQUATOOL correspondiente a la herramienta OPTIGES para permitir el trabajo con los nuevos elementos incluidos.
- Estudio de la relación entre las características de un sistema de estudio con el criterio de convergencia a emplear posteriormente en la iteraciones y formulación de la misma si es posible

Referencias

- Ahuja R, Magnanti T, Orlin J (1993) Network Flows: theory, algorithms and applications. Prentice Hall, New York
- Andreu J (1992) Modelo OPTIGES de Optimización de la Gestión de Esquemas de Recursos Hídricos. Manual del programador. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia
- Andreu J (1992) Modelo OPTIGES de Optimización de la Gestión de Esquemas de Recursos Hídricos. Manual del usuario. Versión 2.0. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia
- Barros M, Tsai F, Yang SL, Lopes J (2003). Optimization of large-scale hydropower system operations. J Water Resour Plan Manag 129, 178-188
- Bazaraa M, Jarvis J (1977) Linear Programming and Network Flows. John Wiley and Sons Inc, New York
- Bersetkas D (1985) A unified framework for primal-dual methods in minimum cost network flows problems. Math Program 32, 125-145
- Bersetkas D, Tseng P (1988) The relax codes for linear minimum cost network flow problems. Ann of Oper Res 13, 125-190
- Bersetkas D, Tseng P (1994) RELAX-IV: A Faster Version of the RELAX Code for Solving Minimum Cost Flow Problems. Completion Report under NSF Grant CCR-9103804. Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, MIT, Boston
- Castelleti A, de Rigo D, Rizzoli AE (2007). Neuro-dynamic programming for designing water reservoir network management policies. Control Eng Pract 15, 1031-1038
- Celeste, A., Billib, M. (2009) Evaluation of stochastic reservoir operation optimization models. Adv Water Resour 32, 1429-1443
- Celeste A, Billib M (2010) The Role of Spill and Evaporation in Reservoir Optimization Models. Water Resour Manag 24, 617-628
- Chaves P, Chang FJ (2008) Intelligent reservoir operation system based on evolving artificial neural networks. Adv Water Resour 31, 926-936
- Chou F, Wu C, Lin C (2006) Simulating Multi-Reservoir Operation Rules by Network Flow Model. ASCE Conf. Proc. 212, 33
- Chung F, Archer M, DeVries J (1989) Network Flow Algorithm Applied to California Aqueduct Simulation. J Water Resour Plan Manag 115, 131-147
- Curet N (1994) An incremental primal-dual method for generalized networks. Comp Oper Res 21, 1051-1059
- Curet (1997) Applying steepest-edge techniques to a network primal-dual algorithm. Comp Oper Res 24, 601-609

- Curet N (1998) Implementation of a steepest-edge primal-dual simplex method for network linear programs. *Ann Oper Res* 81, 251-270
- Dasgupta S, Papadimitriou C, Vazirani U (2006). *Algorithms*. McGraw-Hill
- Deka PC, Chandramouli V (2009) Fuzzy Neural Network Modeling of Reservoir Operation. *J Water Resour Plan Manag* 135, 5-12
- Devi S, Srivastava DK, Mohan C (2005) Optimal Water Allocation for the Transboundary Subernarekha River, India. *J Water Resour Plan Manag* 131, 253-269
- Ford L, Fulkerson D (1962) *Flows in networks*. Princeton University Press, Princeton
- Fredericks J, Labadie J, Altenhofen J (1998) Decision Support System for conjunctive Stream-Aquifer Management. *J Water Resour Plan Manag* 124, 69-78
- Galelli S, Soncini-Sessa R (2010) Combining metamodelling and stochastic dynamic programming for the design of reservoir release policies. *Environ Model Softw* 25, 209-222
- Ghahraman B, Sepaskhah AR (2004). Linear and non-linear optimization models for allocation of a limited water supply. *Irrig and Drain* 53, 39-54
- Hinçal O, Altan-Sakarya AB, Ger AM (2011) Optimization of Multireservoir Systems by Genetic Algorithm. *Water Resour Manag* 25, 1465-1487
- Ilich N (2009) Limitations of Network Flow algorithms in River Basin Modeling. *J Water Resour Plan Manag* 135, 48-55
- Kennington JL, Helgason RV (1980) *Algorithms for Network Programming*. John Wiley and Sons, New York
- Khaliqzaman, Chander S (1997) Network Flow Programming Model for Multireservoir Sizing. *J Water Resour Plan Manag* 123, 15-21
- Klingman D, Napier A, Stutz J (1974) NETGEN – A program for Generating Large Scale (Un) Capacitated Assignment, Transportation, and Minimum Cost Flow Problems. *Manag Sci* 20, 814-822
- Kuczera G (1993) Network Linear Programming Codes for Water-Supply Headworks Modeling. *J Water Resour Plan Manag* 119, 412-417
- Labadie J, Baldo M, Larson R (2000) MODSIM: Decision support system for river basin management. Documentation and user manual. Dept. Of Civil Engineering, CSU, Fort Collins
- Labadie J (2004) Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-of-the-Art Review. *J Water Resour Plan Manag* 130, 93-111.
- Léville H, Sally H, Cour J (2003) Testing water demand management scenarios in a water-stressed basin in south Africa: application of the WEAP model. *Phys Chem Earth* 28, 779-786
- Loucks, D. (1992) Water Resource System Models: Their Role in Planning. *J Water Resour Plan Manag* 118, 214-223.
- MMA (2008). Confederación Hidrográfica del Duero. Memoria 2008. <http://www.chduero.es/Inicio/Publicaciones/tabid/159/Default.aspx>. Last accessed 09 March 2011

- Moeini R, Afshar A, Afshar MH (2011) Fuzzy rule-based model for hydropower reservoirs operation. *Electr Power Energy Syst* 33, 171-178
- Mousavi SJ, Ponnambalam K, Karray F (2007) Inferring operating rules for reservoir operations using fuzzy regression and ANFIS. *Fuzzy Set Syst* 158, 1064-1082
- Nicklow J et al (2010) State of the Art for Genetic Algorithms and Beyond in Water Resources Planning and Management. *J Water Resour Plan Manag* 136, 412-432
- Rani D, Moreira M (2010) Simulation-Optimization Modeling: A Survey and Potential Application in Reservoir Systems Operation. *Water Resour Manag* 24, 1107-1138
- Sabet H, Creel C (1994) Network Flow Modeling of Oroville Complex. *J Water Resour Plan Manag* 117, 301-320
- Sechi G, Zuddas P. (2008) Multiperiod Hypergraph Models for Water Systems Optimization. *Water Resour Manag* 22, 307-320
- Sun YH, Yeh W, Hsu NS, Louie P (1995) Generalized Network Algorithm for Water-Supply-System Optimization. *J Water Resour Plan Manag* 121, 392-398
- Wurbs R (1993) Reservoir-System Simulation and Optimization Models. *J Water Resour Plan Manag* 119, 455-472
- Wurbs R (2005) Modeling river/reservoir system management, water allocation, and supply reliability. *J Hydrol* 300, 100-113
- Yamout G, El-Fadel M (2005) An Optimization Approach for Multi-Sectoral Water Supply Management in the Greater Beirut Area. *Water Resour Manag* 19, 791-812
- Yates D, Sieber J, Purkey D, Hubert-Lee A (2005) WEAP21 – A Demand-, Priority-, and Preference-Driven Water Planning Model. Part 1: Model Characteristics. *Water Int* 30, 487-500.

Apéndices

Apéndice A. El modelo OPTIGES de optimización de la gestión de esquemas de recursos hídricos

El modelo OPTIGES (Andreu 1992), desarrollado desde 1987 por el grupo de investigación de Ingeniería de Recursos Hídricos (GIRH), actualmente integrado en el Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) es un programa de uso general que permite la optimización de un sistema de recursos hidráulicos. El modelo se encuentra integrado en el Sistema de Soporte a la Decisión AQUATOOL (Andreu 1996).

Para su utilización el usuario ha de confeccionar previamente un esquema simplificado del sistema de forma que este esté constituido por los elementos que en el modelo se contemplan y que básicamente son conducciones (naturales y artificiales), nudos (de unión, de bifurcación y de almacenamiento), aportaciones, y demandas (zonas de uso). El usuario suministra al programa los datos de la configuración de este esquema o red, juntamente con los datos físicos de los elementos (por ejemplo: capacidades máximas de embalses, o de conducciones), los datos relativos a recursos y demandas, así como los que sirven para fijar prioridades dentro del esquema, y para definir criterios de garantía de satisfacción de las demandas y requerimientos ambientales.

El programa trabaja con valores mensuales, y permite optimizaciones de períodos de un año (12 meses) en adelante, con un número de períodos de optimización también fijado por el usuario (por ejemplo, se pueden hacer para unos datos de 40 años de aportaciones: 8 intervalos de optimización quinquenal, ó 20 intervalos de optimización bienal,...). El modelo proporciona las soluciones óptimas según la función objetivo que se define más adelante, dando los valores de volúmenes embalsados, caudales circulantes y déficits, en cada mes, así como un resumen final de todo el horizonte en estudio que incluye valores medios, mensuales y anuales de todas las variables, número de fallos, garantías, y déficits máximos.

El desarrollo de OPTIGES surge de la necesidad de usar un modelo sencillo para el filtrado de alternativas para la resolución de problemas de gestión de recursos hidráulicos. El punto de arranque lo supone el uso de optimización de redes de flujo para el estudio “Modelo matemático de simulación del sistema hidrográfico de los ríos Júcar y Turia” realizado para la D.G.O.H. (Confederación Hidrográfica del Júcar) en el cual se realizó un modelo ad-hoc para el sistema estudiado. Vista la conveniencia de un modelo general, este empezó a gestarse en el seno del proyecto de investigación “Metodología para el estudio de la utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas” financiado por la Fundación Ramón Areces, y la primera versión del modelo se utilizó en el “Estudio complementario de embalses en la vertiente mediterránea de Navarra” para la Comunidad Foral de Navarra. La versión actual es el

resultado de la introducción de un número de opciones y mejoras en el marco del “Estudio sobre disponibilidades, regulación y balances hidráulicos de la cuenca del Segura”, realizado para la D.G.O.H. (Confederación Hidrográfica del Segura).

A.1. Descripción de los elementos

La primera tarea para la utilización del modelo es la confección de un esquema simplificado de la cuenca. El esquema simplificado es similar a una red de flujo, en la que se refleja la infraestructura existente en la cuenca. Básicamente consta de conducciones (naturales y artificiales), nudos (de unión, de bifurcación y de almacenamiento), aportaciones y demandas (zonas de uso).

A.1.1. Nudos

Los nudos son elementos puntuales, y se requiere el uso de uno siempre que bien en un lugar confluyan o diverjan dos o más conducciones, o bien dicho punto tenga capacidad de almacenamiento (un embalse). De esta forma, pueden diferenciarse dos tipos de nudos en el modelo: (1) nudos corrientes, o de transferencia, correspondientes al primer caso y que no requieren en su caracterización más que de un número de identificación; y (2) nudos embalse que, aparte de por su número de identificación, están caracterizados por su capacidad de embalse, la cual puede cambiarse mes a mes.

En los embalses también puede/debe definir la curva superficie-volumen y los valores medios de evaporación mensual, de esta forma se tiene en cuenta la evaporación del embalse. Cuando un embalse alcanza el volumen mínimo, se considera que no tiene pérdidas por evaporación, de forma que el volumen nunca bajará del mínimo declarado.

A.1.2. Conducciones

Son elementos que corresponden a tramos de río, canales, etc., por los cuales circula el agua de un nudo a otro, siempre en una sola dirección preestablecida por el usuario. Por lo tanto, las conducciones, al igual que los arcos de una red de flujo, se caracterizan por su nudo inicial, su nudo final, sus capacidades máxima y mínima (p.e. caudal mínimo) y la prioridad de este caudal mínimo. Tanto las capacidades máximas como las mínimas pueden definirse para cada mes del año. Las prioridades en las conducciones siempre se entienden relativas a los otros posibles tramos con caudales mínimo definidos, siendo prioritario el de menor número de prioridad.

A.1.3. Aportaciones

Corresponden a entradas de agua en el sistema provenientes de partes de la cuenca que no se incluyen en el esquema. Vienen definidas únicamente por el nudo en donde se incorporan al sistema, el nombre de archivo donde han de leerse y un coeficiente para multiplicar los valores de ese archivo (para cambiar las unidades, rebajar o

incrementar la escala de los datos, representar pérdidas no incluidas en otros puntos del modelo).

A.1.4. Demandas

Corresponden a zonas donde el agua es utilizada (demandas urbanas o agrarias). Vienen definidas por el nudo de donde toman, la demanda anual, el reparto de ésta dentro del año, y la prioridad. También es necesario especificar un coeficiente de retorno (fracción e la demanda no consumida y devuelta al sistema). En cuanto a la prioridad, sirve lo dicho para las conducciones.

A.1.5. Elementos de retorno

Corresponden a reintegros de agua procedentes de la fracción de las demandas que no es consumida y que se reintegran al sistema. Un elemento puede ser usado por una o más demandas. Para definir el elemento de retorno simplemente es necesario suministrar al modelo el número del nudo donde se supone que se incorporan los caudales correspondientes.

A.1.6. Optimización y función objetivo

La optimización de la gestión del sistema para un período de N años es realizada por el modelo minimizando la función objetivo siguiente:

$$\sum_{t=1}^{N \cdot 12} \left[\sum_{i=1}^{n_c} \sum_{j=1}^{n_i} \alpha_{i,j} d_{i,j,t} + \sum_{i=1}^{n_d} \sum_{j=1}^{n_{i'}} \beta_{i,j} d'_{i,j,t} \right] - \sum_{i=1}^{n_e} \delta_i v_{i,N \cdot 12} \quad (3.1)$$

donde,

- n_c es el número de conducciones en el esquema, cada una de ellas con el caudal mínimo dividido en n_i niveles.
- n_d es el número de demandas en el esquema, cada una de ellas con la demanda dividida en $n_{i'}$ niveles.
- n_e es el número de embalses en el esquema.
- n_i es el número de niveles en que se divide el caudal mínimo de la conducción i .
- $n_{i'}$ es el número de niveles en que se divide la demanda i .
- $\alpha_{i,j}$ es el factor de ponderación asignado al posible déficit $d_{i,j,t}$ del nivel j del caudal mínimo de la conducción i en el mes t .
- $\beta_{i,j}$ es el factor de ponderación asignado al posible déficit $d'_{i,j,t}$ del nivel j de la demanda i en el mes t .

La función objetivo es lineal y trata de minimizar la suma ponderada de déficits de caudales ecológicos, déficits de suministro a zonas de demanda, y maximizar el volumen almacenado en embalses al final de cada período de optimización elegido.

Los factores de ponderación vienen dados por expresiones que reflejan las prioridades asignadas por el usuario a cada caudal ecológico, cada demanda y cada embalse.

Podría observarse que la función objetivo presentada en la ecuación (3.18) difiere mucho de la función objetivo que ha venido tratándose hasta el momento en este capítulo, por ejemplo la ecuación (3.1). Sin embargo, lo que se está haciendo en la ecuación (3.18) es reescribir la (3.1) en función de los costes asociados al flujo en los diferentes arcos de la red de flujo generada por OPTIGES. Es decir, la función objetivo que resuelve OPTIGES sigue siendo la mostrada en la ecuación (3.1), pero los costes asociados al flujo asignados en determinados arcos de la red están orientados a la minimización de los déficits tanto en demandas como en tramos con caudales ecológicos y en maximizar el volumen almacenado en los embalses como ya se explicó en el apartado anterior, alcanzándose la ecuación (3.18).

Puesto que las restricciones son también lineales, y el esquema de cuenca se configura internamente como una red de flujo, se utiliza para la optimización el algoritmo Out-of-Kilter, como ya se ha comentado anteriormente. Para ello el modelo configura previamente, a partir del esquema de la cuenca que utiliza el usuario y en base a los datos físicos y de prioridades proporcionados sobre el sistema, una red de flujo conservativa que contempla además todos los meses del período temporal a optimizar. Esta gran red de flujo interna es la que es resuelta por el algoritmo. Y una vez resuelta, los resultados en términos de flujos en la red son traducidos por el programa en variables hidrológicas verdaderas.

A.2. Elementos no lineales

El modelo OPTIGES permite considerar en la optimización dos aspectos de carácter no lineal como son la evaporación de los embalses y los retornos de las demandas. La inclusión de estas dos características se realiza mediante la resolución iterativa de la red. En una primera iteración se resuelve el problema considerando únicamente, los aspectos lineales, posteriormente se calculan tanto la evaporación como los retornos asociados a esa primera iteración y se realizan los cambios necesarios en la red para incluirlos como elementos lineales. La red se resuelve de forma iterativa hasta que se alcanza el criterio de convergencia o se alcanza el máximo de iteraciones definido.

A.3. Resultados

El programa proporciona los resultados de la optimización en forma de cuadros, uno para cada año hidrológico, que contienen los valores correspondientes a cada mes del mismo, así como los totales anuales. Además, al final del horizonte proporciona un cuadro con los valores medios mensuales y anuales. Para las conducciones el resumen proporciona los volúmenes circulados, y además el número de fallos de caudales ecológicos, así como la garantía de los mismos. Para las demandas el resumen

proporciona también el número de fallos (déficits), la garantía, la garantía volumétrica, el máximo déficit en un mes, y el máximo déficit en dos meses consecutivos.

A.4. Aplicaciones prácticas del modelo OPTIGES

El modelo OPTIGES se ha empleado, como ya se ha comentado al principio de este apartado, en el desarrollo de estudios en cuencas españolas. Así, en Andreu (1993), se presenta una optimización del esquema simplificado del río Segura con fines puramente académicos. También se encuentra que se ha realizado una aplicación de OPTIGES en la elaboración del “Esquema Temporal de Temas Importantes” de la Demarcación Hidrográfica del Segura (D.H.S., 2008). Otra aplicación importante se da en la elaboración del “Libro Blanco del Agua” mediante la creación de un modelo de optimización del sistema hidráulico español completo, aunque simplificado (M.M.A., 2000).

A.5. Limitaciones del modelo OPTIGES

En el capítulo anterior ya se citaron las razones por las cuales los modelos de optimización no se utilizan tanto como los de simulación (Labadie 2004).

Centrándonos ahora en el modelo OPTIGES tenemos un modelo que puede preparar optimizaciones de sistemas durante periodos muy largos, tan largos como largas sean las series de aportaciones que se alimenten al modelo. Por supuesto, cuanto más largo sea el periodo de optimización, mayor será el tamaño de la red de flujo y esto, obviamente, tendrá un coste computacional más elevado. También, el número de elementos incluidos en el esquema del sistema de recursos hídricos a optimizar afectará al tamaño de la red, ya que cada elemento supone la inclusión de una determinada cantidad de arcos y nudos en la red para cada mes del periodo de optimización. Todo esto lleva a la necesidad de tener que crear modelos muy sencillos de los sistemas lo que, a su vez, los aleja bastante de la realidad. Si, además, con la intención de mejorar la representatividad del modelo, introducimos elementos con comportamientos no lineales que se resuelven mediante iteraciones, lo que implica resolver la misma red en repetidas ocasiones, volvemos a encontrarnos con el problema del tiempo de computación. Parece que llegamos a un callejón sin salida, por un lado se crean modelos poco representativos de la realidad por falta de elementos y, por otro, no se incluyen elementos nuevos porque supondrían un incremento del tiempo de ejecución del algoritmo en ocasiones prohibitivo.

Para salir de este circuito cerrado, resulta obvio que lo más adecuado es incrementar la capacidad de cálculo de forma que se tarde menos en realizar una iteración. Una vez logrado esto, la introducción de nuevos elementos en los esquemas de OPTIGES como por ejemplo los acuíferos (muy importantes) y las centrales hidroeléctricas, debería ser prácticamente obligatorio.

Apéndice B. Transcripción de la subrutina ACUIFERO

Una de las principales aportaciones de esta tesina al modelo OPTIGES es la creación de la subrutina ACUIFERO para la inclusión de acuíferos en los modelos de optimización. A continuación se reproduce la última versión de dicha subrutina previa a la presentación de esta tesina con fecha de 28 de Junio de 2011.

```
SUBROUTINE ACUIFERO
C
C
      INCLUDE 'PARAMET.FOR'
      INCLUDE 'COMDAT.FOR'
      INCLUDE 'COMRED.FOR'
C*****
C*****
C EN ESTA SUBROUTINA SE SIMULA EL ACUIFERO A LO LARGO DE CADA PASO DE
CALCULO
C POSTERIORMENTE SE REVISAN LAS DETRACCIONES IMPOSIBLES ASI COMO LOS
PARAMETROS DE CONTROL
C FINALMENTE SE MODIFICAN AQUELLAS PARTES DE LA RED AFECTADAS POR EL
ACUIFERO COMO SON LOS TRAMOS TIPO 3
C LOS BOMBEOS
C*****
      REAL:: AFEACUI_(MAXAE+1)

INTEGER:: BDC(MAXDEM), BBA(MAXBAD), MARCADEM(MAXDEM), MARCABAD(MAXBAD)
      INTEGER CODPC, BAC
      REAL QN, VF2, VF2_, VF1, QCON
      EXTERNAL PCBOMBEO, KFLOW
C
C CON ESTE MARCADOR, DE MOMENTO, VOY A INTENTAR HACER QUE LOS
BOMBEO SE REDUZCAN DE FORMA PROGRESIVA EN LUGAR DE ANULARSE
      BOMPRO=1
C
C INICIO SIMULACIM POR ACUIFERO
      DO I=1, NACU
C TIPO DE ACUIFERO
      IT=ITACU(I)
C
C*****
C*****
C INICIO BUCLE ANUAL
      DO IANY=1, NANY
      IAN12=(IANY-1)*12-1
C
C INICIO BUCLE MENSUAL
      DO IMES=1, 12
      NMES=IMES+(IANY-1)*12
      K1=NAR1AC(I)+IAN12+1+IMES
      K2=K1+NANY*12
C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
CCCCC
C INICIALIZACIM DE VARIABLES
C
```

```

C      VF1 ES EL VOLUMEN ALMACENADO EN EL ACUERO RESULTANTE DE LA RED
DE FLUJO
C      QUE SERVIR`PARA REALIZAR LA PRIMERA COMPARACIM, EN LA ITERACIM,
      IF (NMES.EQ.1) VF1=(KARC(K1)-KARC(K2))/100. ! solo para el
mes 1 el resto cogen el resultado de este proceso
C
C      COPIA DE LAS AFECCIONES SOBRE EL ACUIFERO PARA EL PROCESO
ITERATIVO
      DO K=1,NAES(I)
          AFEACUI_(K) =AFEACUI(I,K,IMES,IANY) ! esto es la copia de
las acciones elementales que se modifica en la revisi e par tros de
control. Y se utilizan despu`del proceso iterativo para modificar los
KSUP y se copian a la matriz general de afeacui
          END DO
          AFEACUI_(NAES(I)+1)=0. ! esta es el t`mino correspondiente a
la acci e compensaci e detracci imposibles
C
      MARCADEM(1:NDEM)=1
      MARCABAD(1:NBAD)=1
C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
CCCCC
C      INICIO PROCESO ITERATIVO PARA COMPROBAR CONVERGENCIA DE
SIMULACIM,
C      DEL ACUERO CON PARMETRO DE CONTROL Y DETRACCIONES IMPOSIBLES
C
      ITERACION=0
      DO
      ITERACION=ITERACION+1
C      ASIGNACIM, DE LOS VALORES DE COMPARACIM, DE LAS ITERACIONES
      IF (NMES.EQ.1) THEN
          VF2_=VF1
      ELSE
          VF2_=PCONT(I,1,NMES)
      END IF
C      PCONT(I,1,NMES)=0.
      SUMAAFE=0.
      DO K=1,NAES(I)+1
          SUMAAFE=SUMAAFE+AFEACUI_(K) !
.....SUMAAFE debe corregirse con los par tros de
control
      END DO
C
C      SIMULACIM, DEL ACUERO EN §
      SELECT CASE (IT)
C      ACUERO UNICELULAR
      CASE (2)
          AL=ALFA(I,1)
          EAL=EALFA(I,1)
          RC=AFEACUI_(1)+AFEACUI_(NAES(I)+1)
          PCONT(I,1,NMES)=PCONT(I,1,NMES-1)*EAL+(1.-EAL)*RC/AL
C      SE CALCULA EL CAUDAL ENTRANTE/SALIENTE POR BALANCE
          PCONT(I,2,NMES)=PCONT(I,1,NMES-1)+SUMAAFE-PCONT(I,1,NMES)
! +entradas - salidas = copia de acciones elementales....
C      ACUIFERO PLURICELULAR
      CASE (7)
C      CLCULO DEL VOLUMEN INICIAL DEL ACUERO
      IF (NMES.EQ.1) THEN
          PCONT(I,1,0)=0.
          DO J=1,NAUT(I)

```



```

C
C      END IF
C
C      COMPROBACION DE CONVERGENCIA DEL ACUERO
C      Se resuman las acciones elementales y se incluye en la
comprobacion e convergencia
SUMAAFE2=0.
DO K=1,NAES(I)+1
    SUMAAFE2=SUMAAFE2+AFEACUI_(K)
END DO
C      SE COMPRUEBA QUE LAS AFECCIONES SON IGUALES AL FINAL DE LA
ITERACION, SI NO, SE HACE UNA MAS
    IF (ABS(SUMAAFE-SUMAAFE2).LT.0.001) THEN
C      UNA VEZ LAS AFECCIONES SON LAS MISMAS, SE COMPRUEBA QUE LOS
VOLUMENES CALCULADOS SEAN LOS MISMOS
C      NINGUNO DE ESTOS VOLUMENES PROVIENE DE LA RED DE FLUJO SINO DE
LA ITERACION DE LA SIMULACION
    IF (ABS(PCONT(I,1,NMES)-VF2_).LE.0.1.OR.ITERACION.GT.10) EXIT
    END IF
C      FINAL ITERACIONES
END DO
    WRITE (19,*) NMES,PCONT(I,1,NMES),PCONT(I,2,NMES),SUMAAFE
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C      REASIGNACION DE LOTES EN LA RED DE FLUJO SEGUN LOS RESULTADOS DE
LA SIMULACION DEL ACUERO EN EL MES
C
C      TRAMOS TIPO 3
    IF (NCOND3.GT.0) THEN
DO J=NCOND1+NCOND2+1,NCOND
C      SI LA CONDUCCION NO ESTE CONECTADA A ESTE ACUERO SE SALTA
    IF (ACUCON(J).EQ.I) THEN
        L1=NAR1TR3(J)+(IAN12+1)*4+(IMES-1)*4
        IF (IQMI(J).EQ.1) L1=L1+((IAN12+1)+(IMES-1))*(2*NNIVQ(I)+1)
C      DEPENDIENDO DE SI EL TRAMO ES PERDEDOR O GANADOR SE
ACTIVAR UN ARCO U OTRO
        IF (PCONT(I,2,NMES).GE.0) THEN
            KSUP(L1)=0
            KSUP(L1+1)=KFLOW(ABS(PCONT(I,2,NMES))*COEFREPON(J))
        ELSE
            KSUP(L1)=KFLOW(ABS(PCONT(I,2,NMES))*COEFREPON(J))
            KSUP(L1+1)=0
        END IF
        KARC(L1)=KSUP(L1)
        KARC(L1+1)=KSUP(L1+1)
C
        QNRED=(KARC(L1+1)-KARC(L1))/100.
        QNCALC=PCONT(I,2,NMES)*COEFREPON(J)
        IF (ABS(QNRED-QNCALC).GT.0.1) ICONV=0
    END IF
END DO
END IF
C
C      BOMBEO DE LAS DEMANDAS
    IF (NDEM.GT.0) THEN
DO J=1,NDEM
    IF (NABDC(J).EQ.I) THEN
        K1=NAR1BO(J)+((IAN12+1)+(IMES-1))*(NNIV(I)+NUMTO(I)+1)
        IF (MARCADEM(J).EQ.0) KSUP(K1)=0
C      IF (BAC.EQ.0.OR.BDC(J).EQ.0) KSUP(K1)=0.

```


Apéndice C. Archivo de datos DATGEN para la ejecución del modelo completo de OPTIGES en el capítulo 5

A continuación se transcribe el archivo de datos que se emplea para la generación del modelo de OPTIGES correspondiente al sistema de recursos hídricos empleado en el capítulo 5 de este texto. No se proporcionan los archivos de aportaciones por resultar de excesiva envergadura para su inclusión en el grueso de este texto.

```
"V 3.0"  
"Parte de simulacion de la cuenca"  
"Rio Mayu"  
60 1 1940  
1 1 0 0  
11 1 3 1 2 4 3 0 1 0 1  
20000 10000 1  
"EmbChicharro"  
2  
0 0 1 0 0  
30.00 42.00 42.00 45.00 45.00 42.00 50.00 50.00 45.00 38.00 30.00 30.00  
1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00  
0 1 5 36 70 109 140 170 227 247  
0 0.1 0.5 1.5 4.5 9 15.5 22.5 42 55  
65.00 40.00 22.68 28.87 37.11 60.82 92.78 113.40 147.42 159.79 136.08 93.81  
30 1 1  
"Chico_Chicharro"  
1 2 0  
0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00  
10000.00 10000.00 10000.00 10000.00 10000.00 10000.00 10000.00 10000.00 10000.00 10000.00  
10000.00 10000.00 10000.00 10000.00  
1 1 0.01  
"Chicharro_Grande"  
2 3 0  
0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00  
10000.00 10000.00 10000.00 10000.00 10000.00 10000.00 10000.00 10000.00 10000.00 10000.00  
10000.00 10000.00 10000.00 10000.00  
1 1 0.01  
"TramoFinal"  
5 11 0  
0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00  
10000.00 10000.00 10000.00 10000.00 10000.00 10000.00 10000.00 10000.00 10000.00 10000.00  
10000.00 10000.00 10000.00 10000.00  
1 1 0.01  
"tr recarga lluvia"
```

6 11
0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00
10000.00 10000.00 10000.00 10000.00 10000.00 10000.00 10000.00 10000.00 10000.00 10000.00
10000.00 10000.00 10000.00 10000.00
1 1 1 1 1
1 1 0.01
"AzudGrande_VertVillaAbajo"
3 4
0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00
10000.00 10000.00 10000.00 10000.00 10000.00 10000.00 10000.00 10000.00 10000.00 10000.00
10000.00 10000.00 10000.00 10000.00
1 2 0 0.8
1 1 0.01
"VertVillaAbajo_ICaVillaAbajo"
4 5
0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00
10000.00 10000.00 10000.00 10000.00 10000.00 10000.00 10000.00 10000.00 10000.00 10000.00
10000.00 10000.00 10000.00 10000.00
1 2 0 0.2
1 1 0.01
"DemVillaAbajo"
0 0 0 0 0 0 0 0
56.67
8.89 8.40 8.40 8.40 7.39 8.21 7.91 8.59 9.11 8.70 7.61 8.40
1 1
50 70 90
1 15 30 2 3 10 8 10
1
"TomaVillaAbajo"
2
72 0.15 0.2
1
1
6.00 6.00 6.00 6.00 6.00 6.00 6.00 6.00 6.00 6.00 6.00 6.00
"DemAgrElNaranjero"
0 0 1 1 0 0 10 1 3
84.21001
3.00 0.00 0.00 0.00 0.65 4.32 5.94 12.27 16.60 25.54 21.32 10.36
1 1
50 70 90
1 15 30 50 75 100 8 10
1
"TomaAgraria"
3
360 0 1
3
0

30.00 30.00 30.00 30.00 30.00 30.00 30.00 30.00 30.00 30.00 30.00 30.00
 "DemVillaAfuera"
 0 0 0 0 0 0 0 0
 46
 0.00 0.00 0.00 21.74 21.74 21.74 21.74 4.35 4.35 4.35 0.00 0.00
 1 1
 50 70 90
 1 15 30 50 75 100 8 10
 1
 "Toma nº 3"
 1
 120 0 1
 170
 0
 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00 10.00
 "VertVillaAbajo"
 4
 "ApoCabecera"
 1
 "ApoCabera"
 1
 "ApoEmbalse"
 2
 "ApoAfluente11"
 1
 "ApoCuencaMedia"
 3
 "ApoCuencaMedia"
 1
 "Recarga lluvia"
 6
 "recargaacuifero25"
 1
 "Acuífero unicelular"
 2
 0 0
 0.02 0

Apéndice D. Gráficas de resultados del test de funcionamiento 1 (apartado 5.5.1).

En el apartado 5.5.1 se llevó a cabo la optimización de un sistema reducido respecto al mostrado en la figura 5.5 para comprobar que el modelo OPTIGES maneja correctamente el reparto de flujos en la red de forma que no se asignen recursos adicionales a los tramos de tipo 3 para recargar el acuífero. Al tenerse cuatro posibles niveles de demanda a cubrir con el bombeo, el volumen de resultados es muy alto como para ser mostrado en el texto general. A continuación se reproduce la batería de gráficos resultante de las cuatro ejecuciones del modelo OPTIGES, cada una para uno de los niveles de demanda que pueden cubrirse con el bombeo a la demanda agrícola.

D.1. Resultados del caso en que el bombeo sólo cubre el primer nivel de la demanda agrícola (50%)

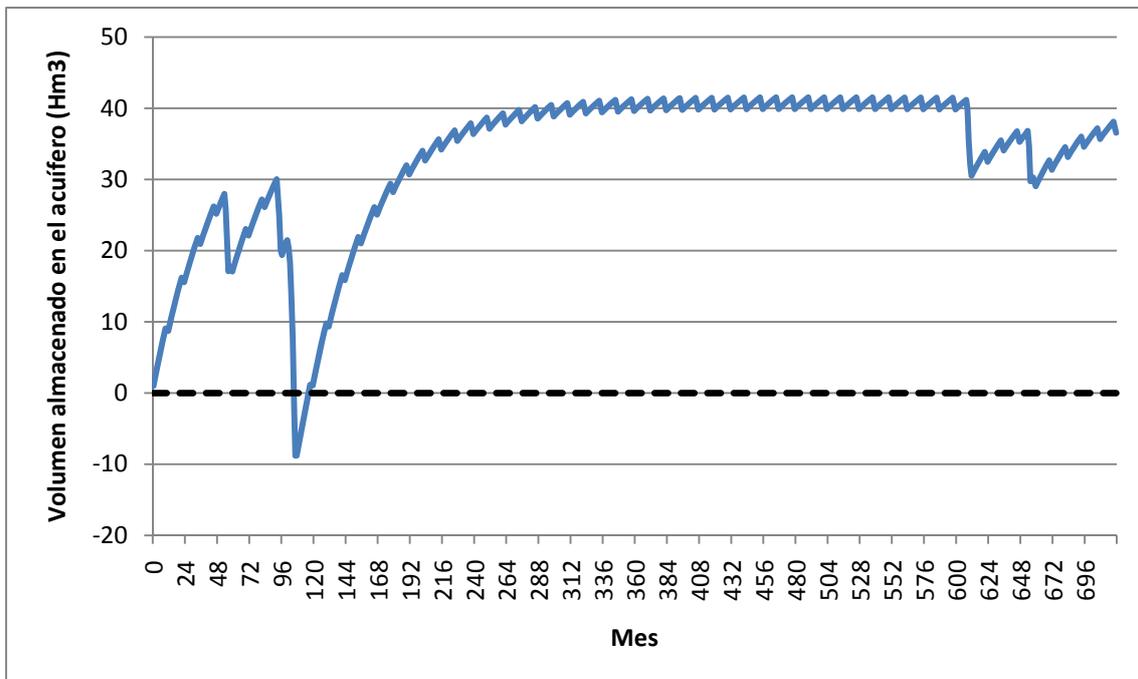


Figura D.1. Volumen almacenado mes a mes en el acuífero

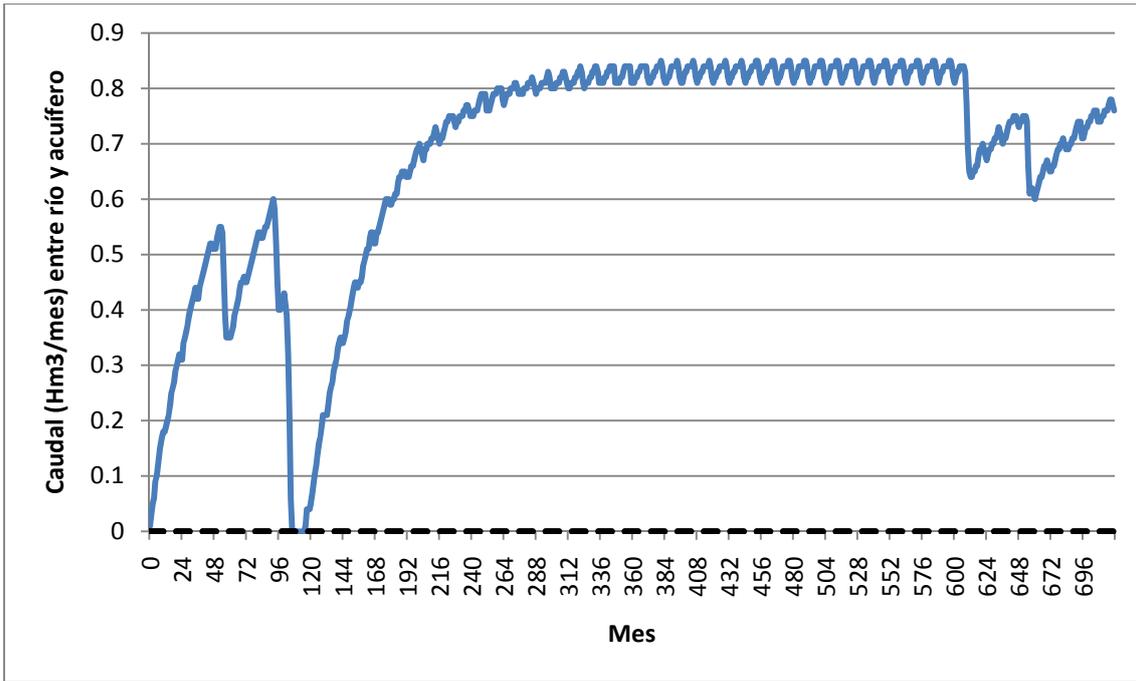


Figura D.2. Caudal entre río y acuífero (positivo del acuífero al río y negativo del río al acuífero)

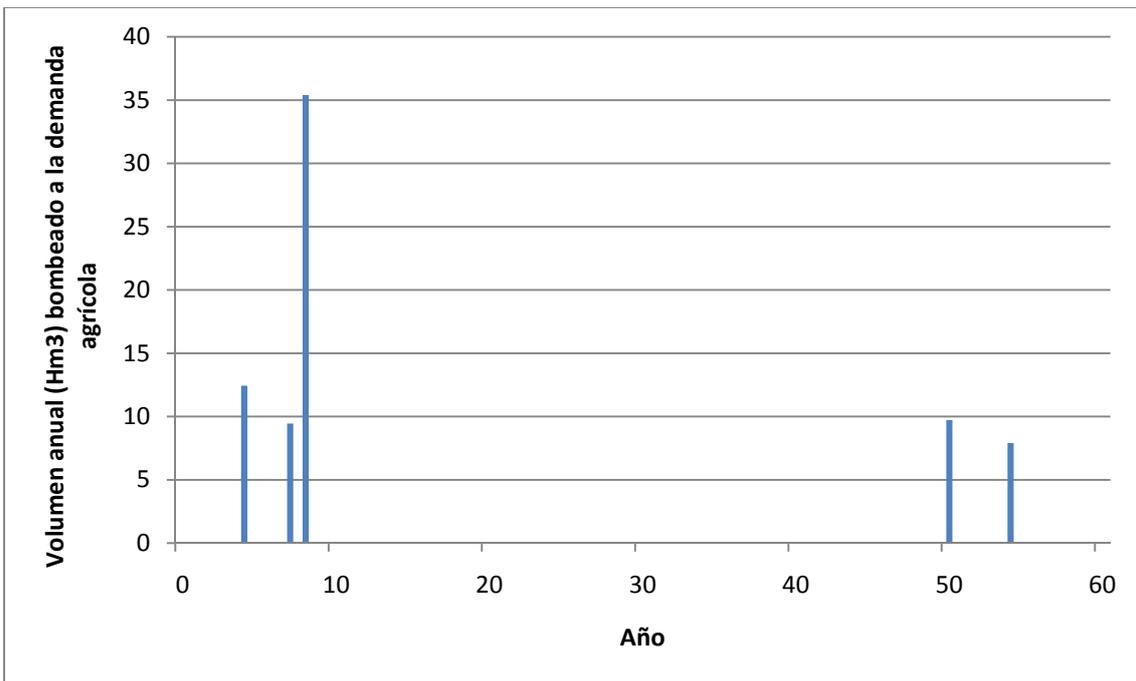


Figura D.3. Volumen bombeado a la demanda agrícola

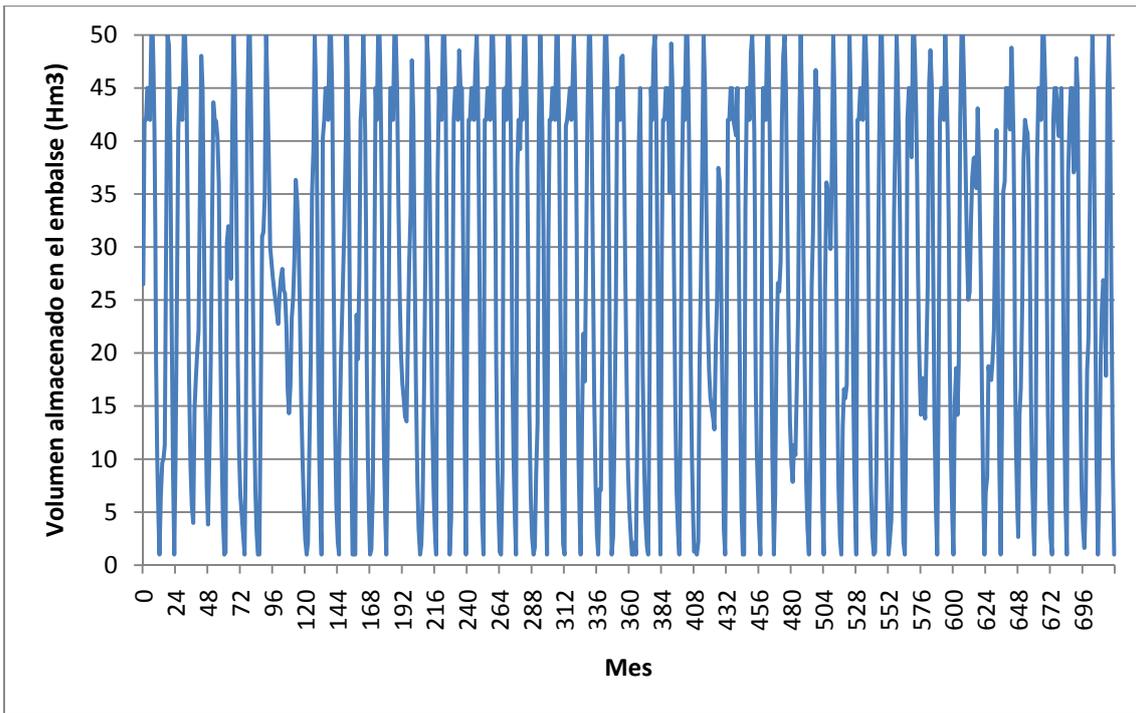


Figura D.4. Volumen mensual almacenado en el embalse

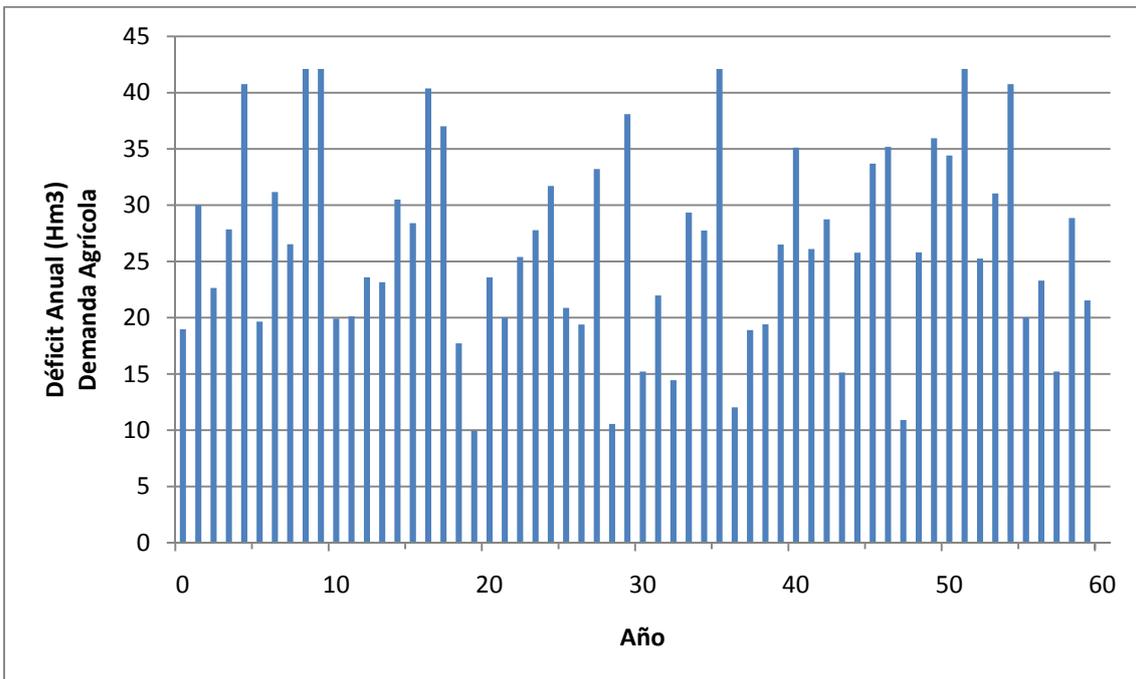


Figura D.5. Déficit anual de la demanda agrícola

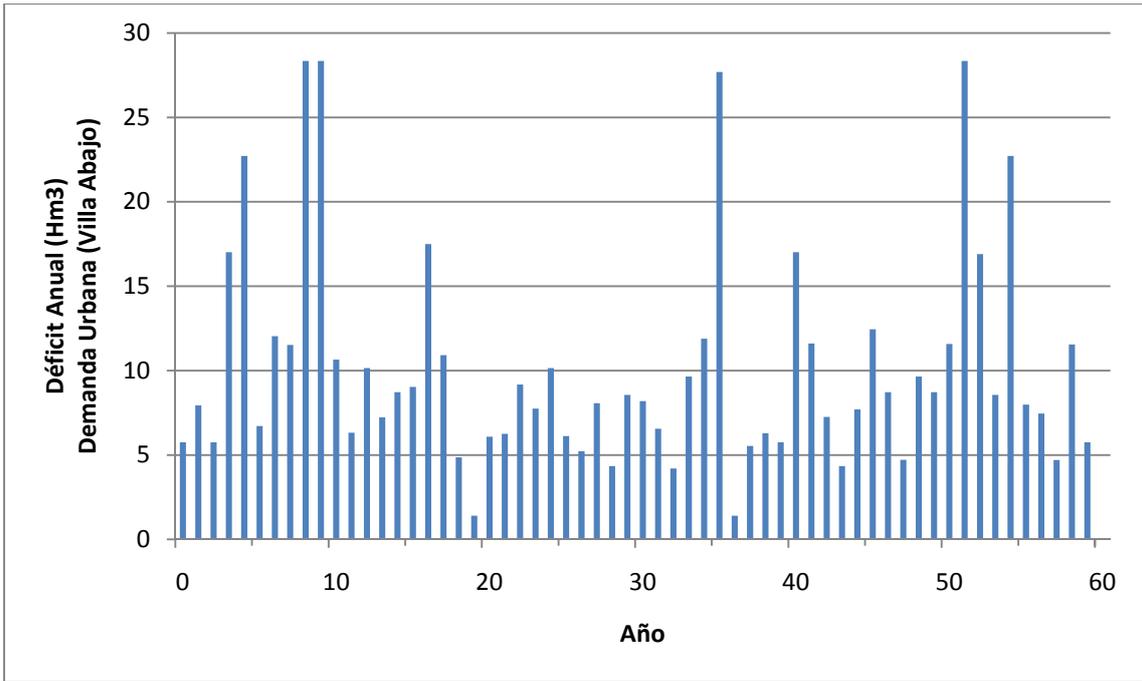


Figura D.6. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Abajo

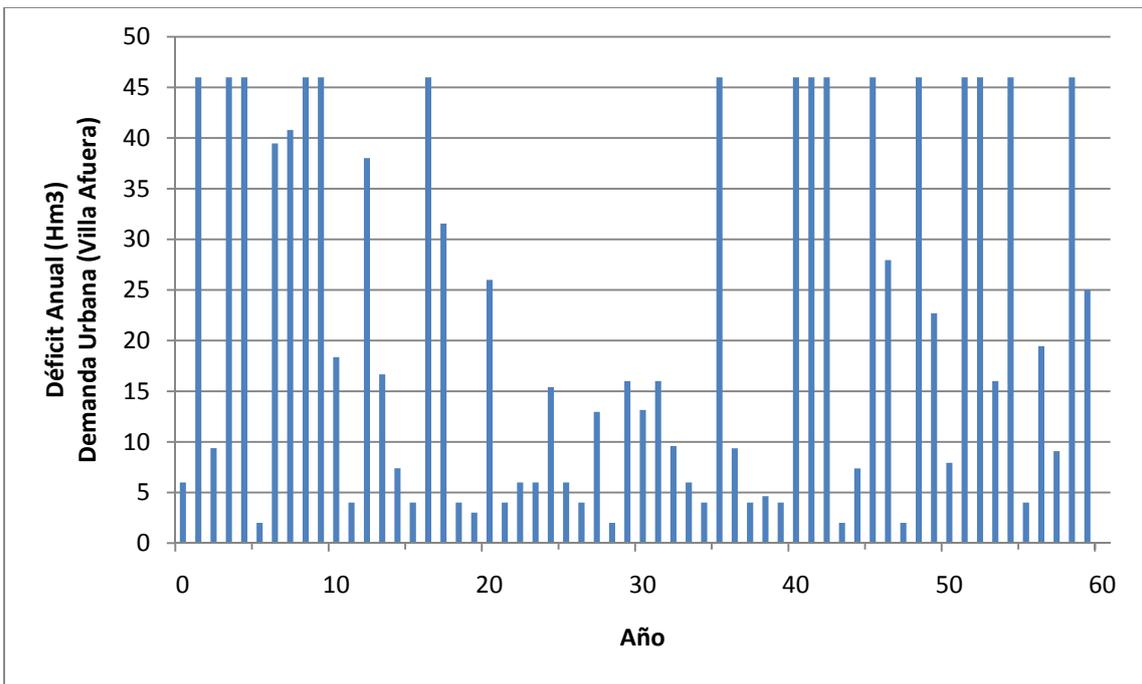


Figura D.7. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Afuera

D.2. Resultados del caso en que el bombeo cubre hasta el segundo nivel de la demanda agrícola (70%)

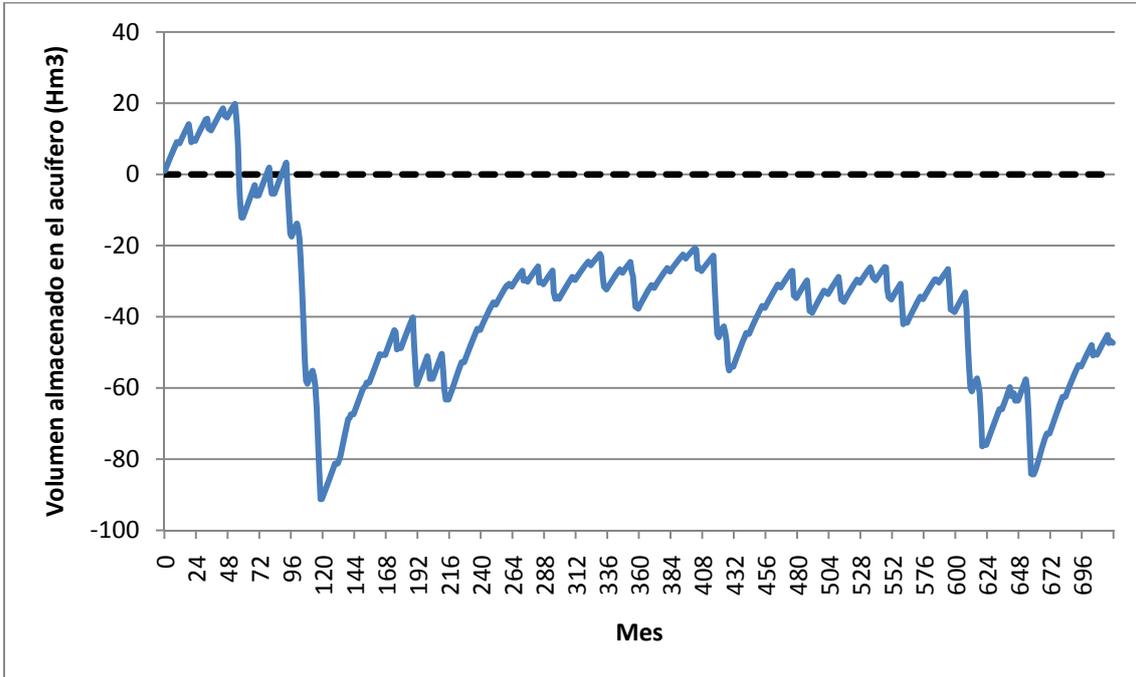


Figura D.8. Volumen almacenado mes a mes en el acuífero

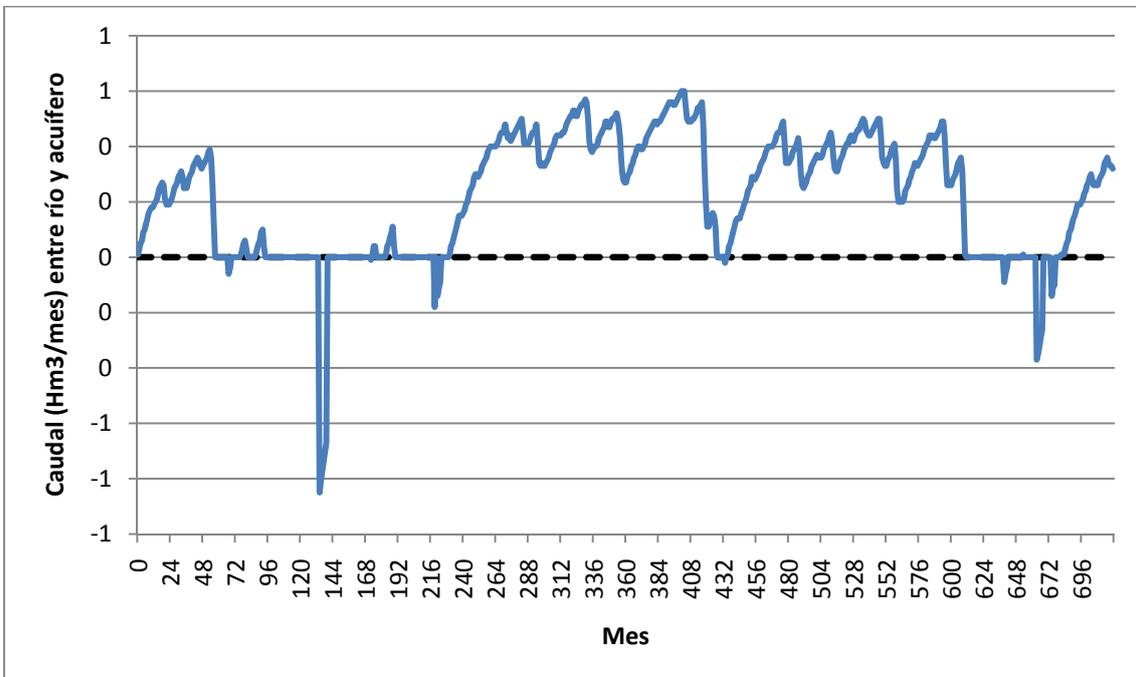


Figura D.9. Caudal entre río y acuífero (positivo del acuífero al río y negativo del río al acuífero)

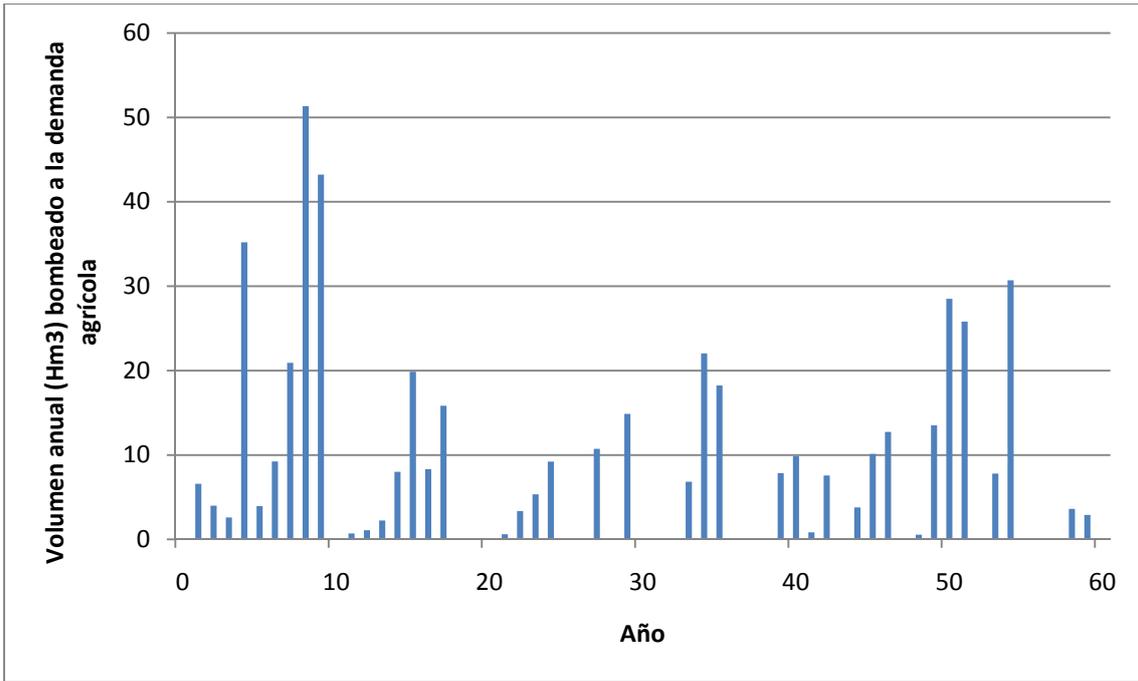


Figura D.10. Volumen bombeado a la demanda agrícola

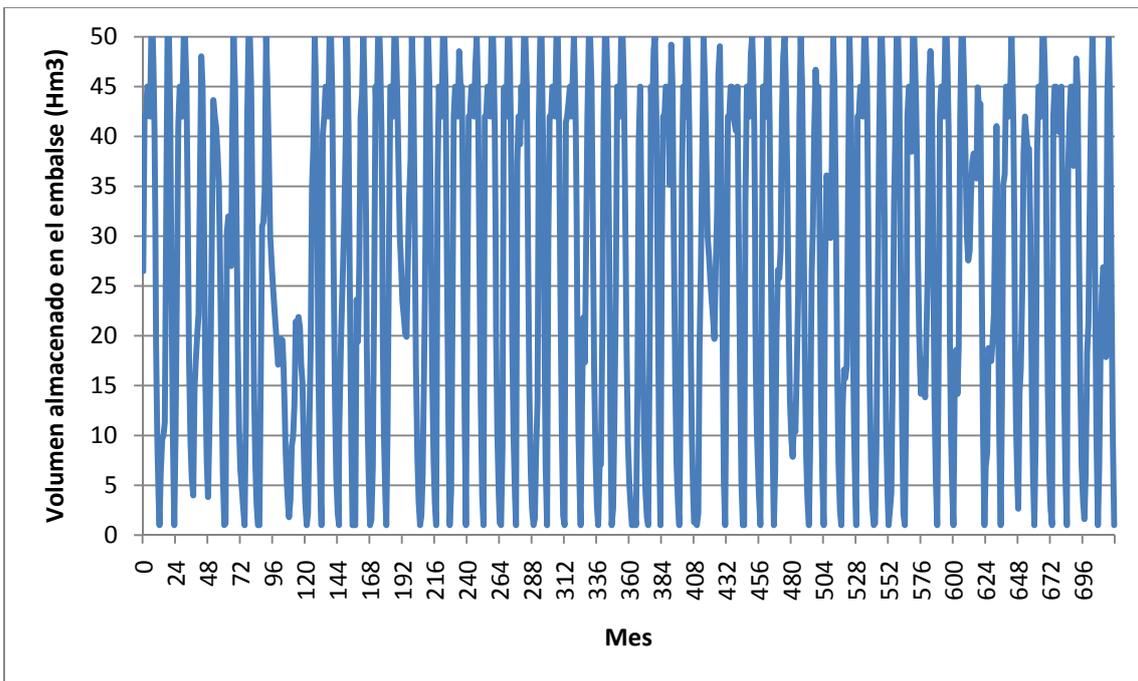


Figura D.11. Volumen mensual almacenado en el embalse

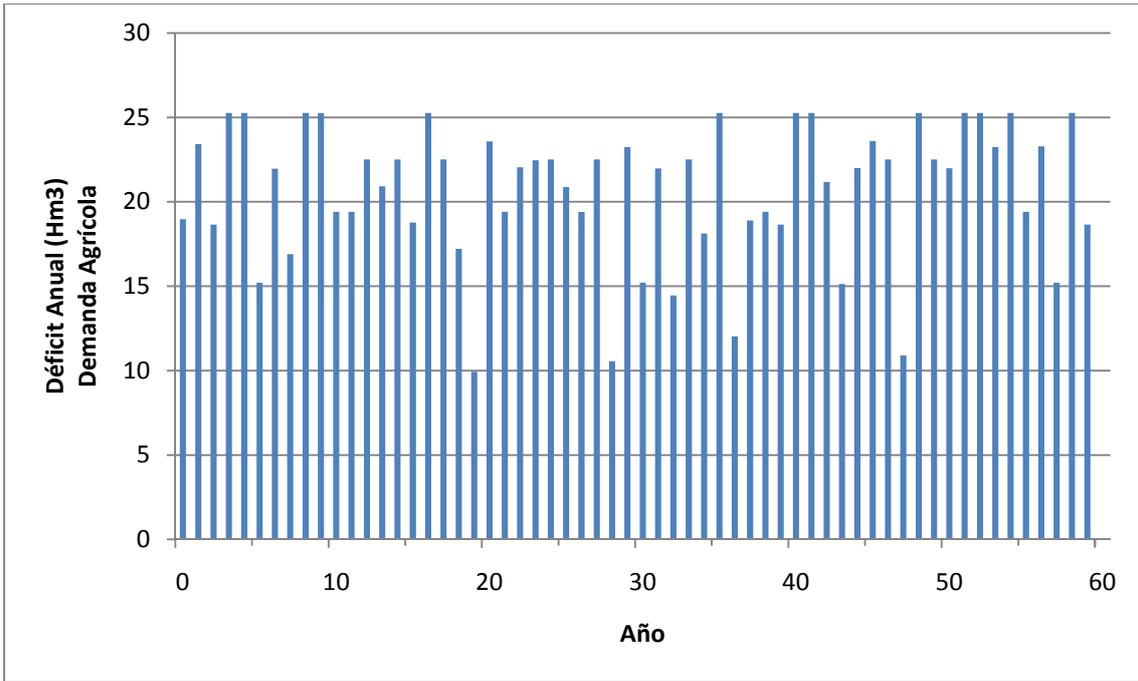


Figura D.12. Déficit anual de la demanda agrícola

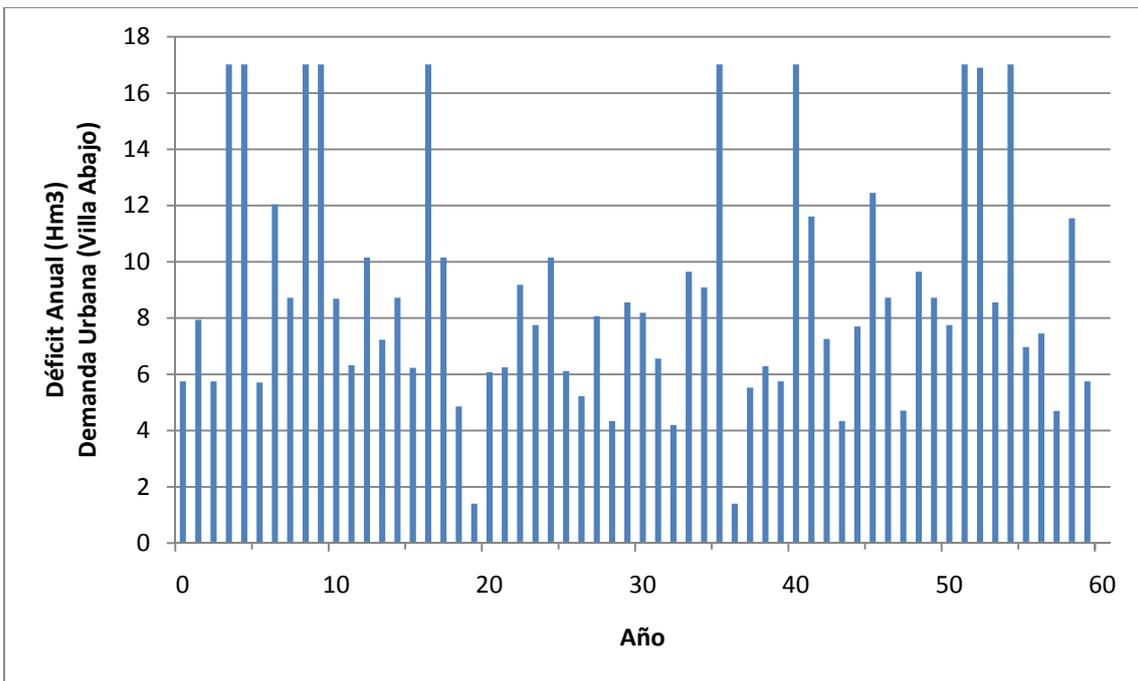


Figura D.13. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Abajo

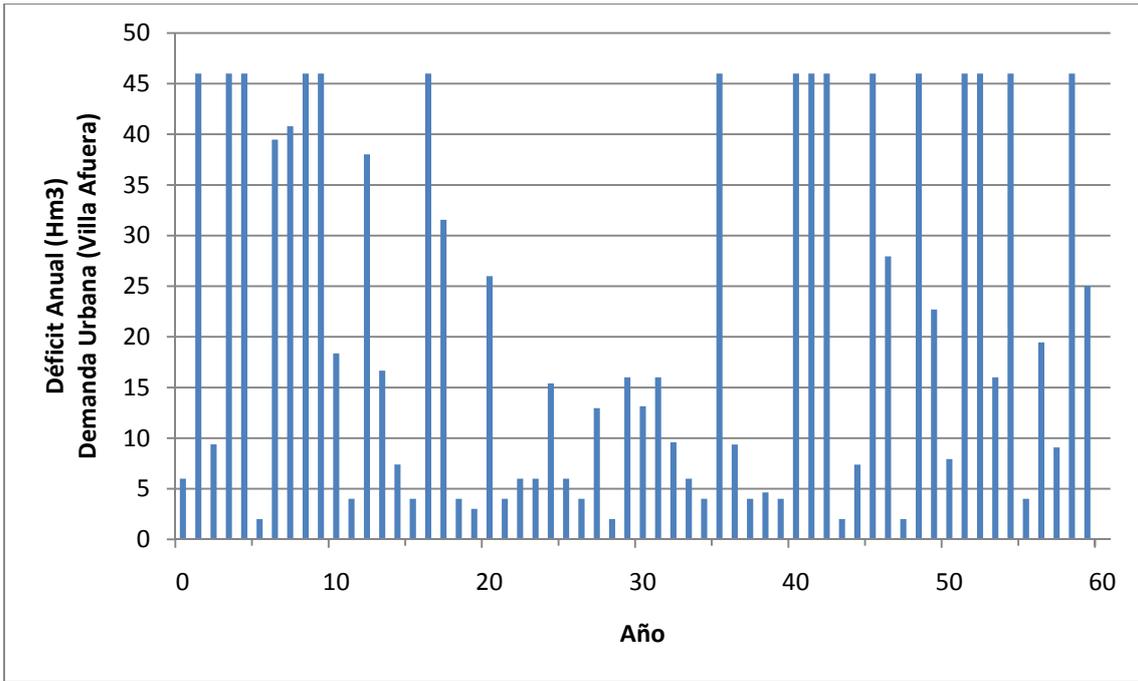


Figura D.14. Déficit Anual de la demanda urbana de Villa Afuera

D.3. Resultados del caso en que el bombeo cubre hasta el tercer nivel de la demanda agrícola (90%)

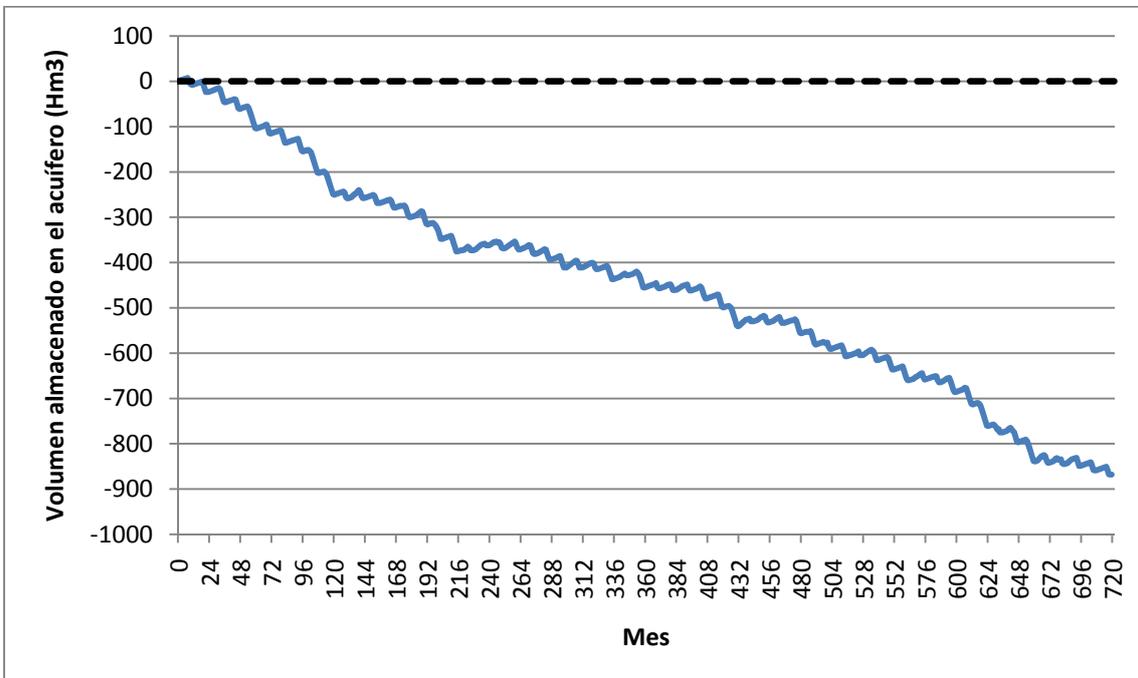


Figura D.15. Volumen almacenado mes a mes en el acuífero

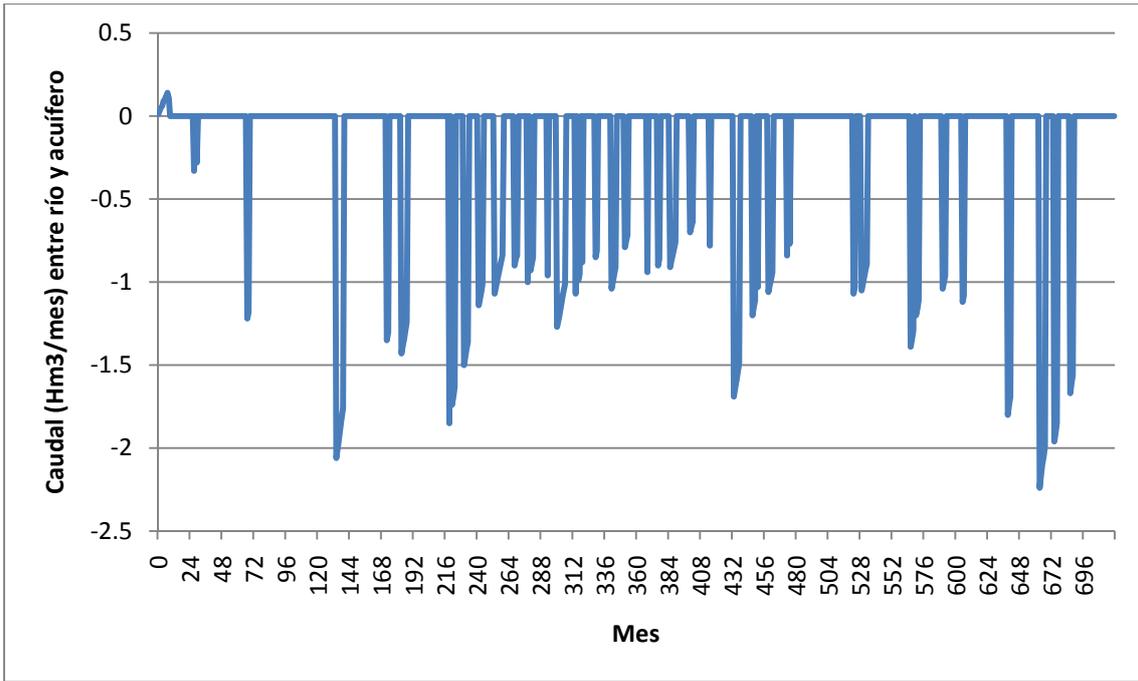


Figura D.16. Caudal entre río y acuífero (positivo del acuífero al río y negativo del río al acuífero)

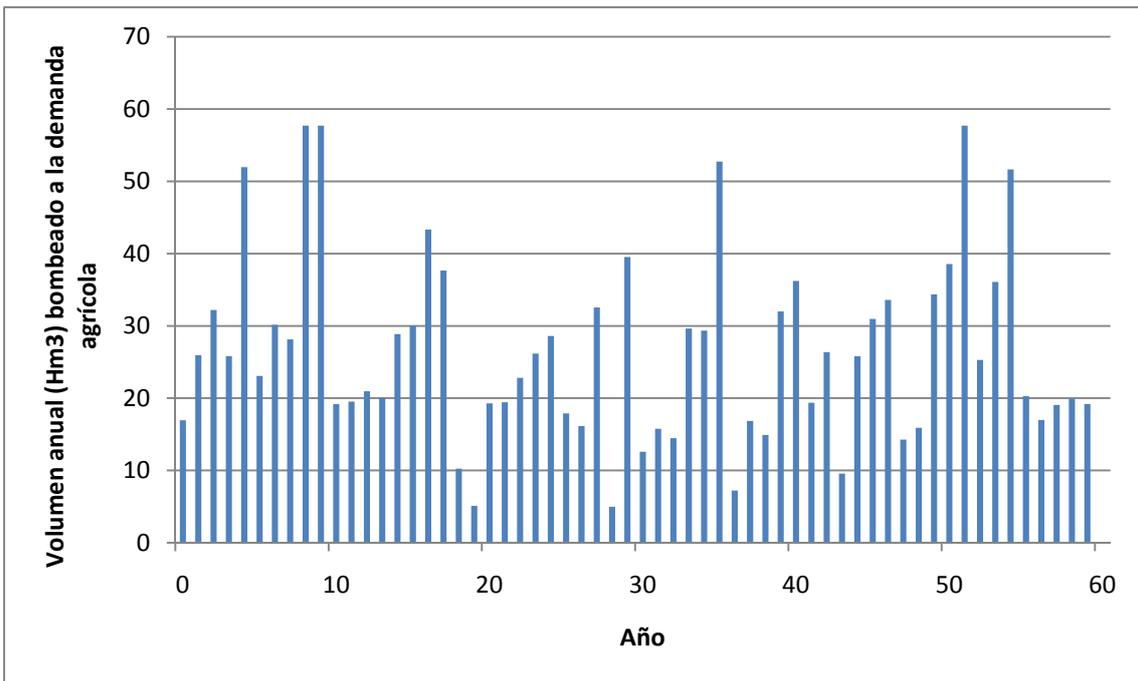


Figura D.17. Volumen bombeado a la demanda agrícola

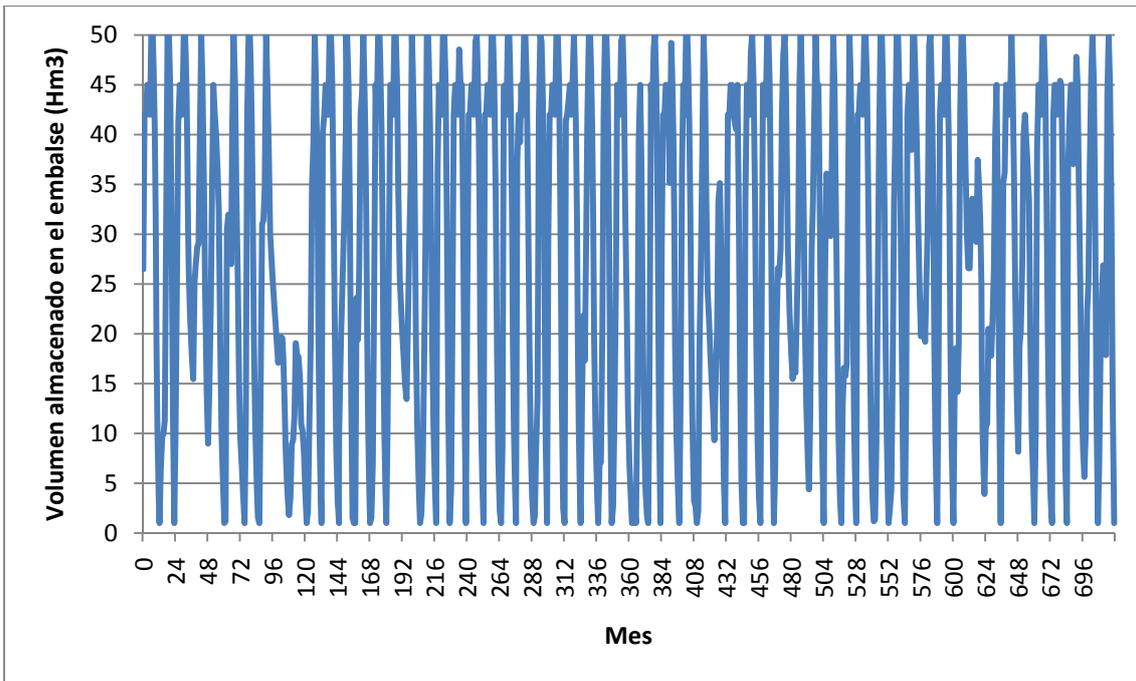


Figura D.18. Volumen mensual almacenado en el embalse

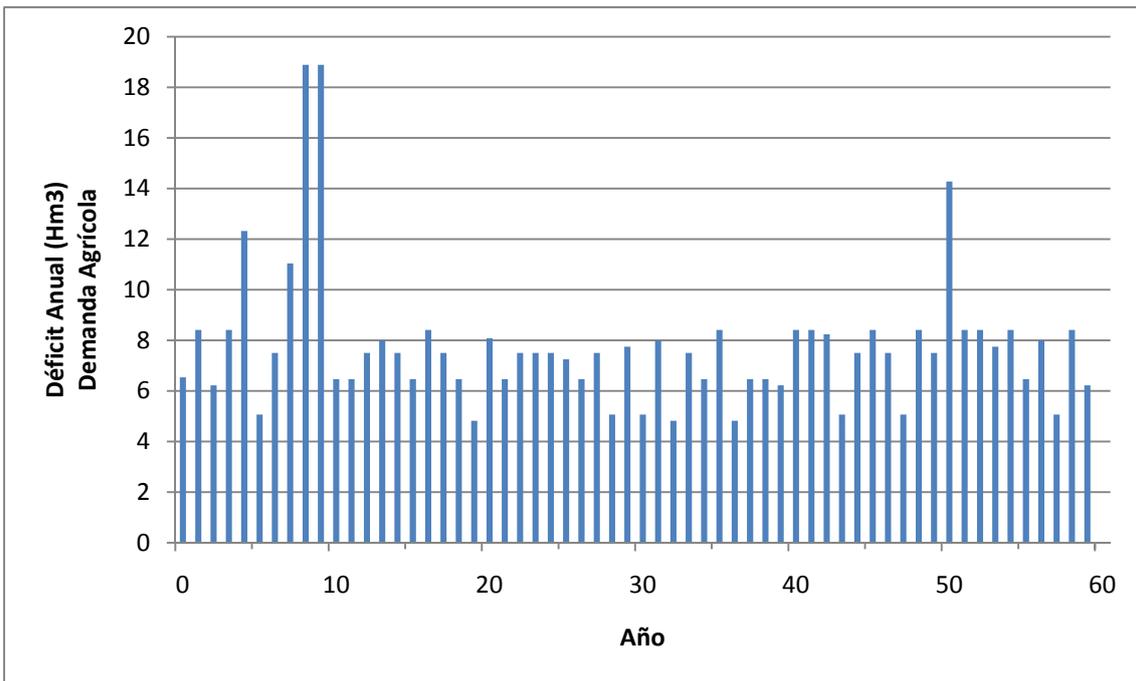


Figura D.19. Déficit anual de la demanda agrícola

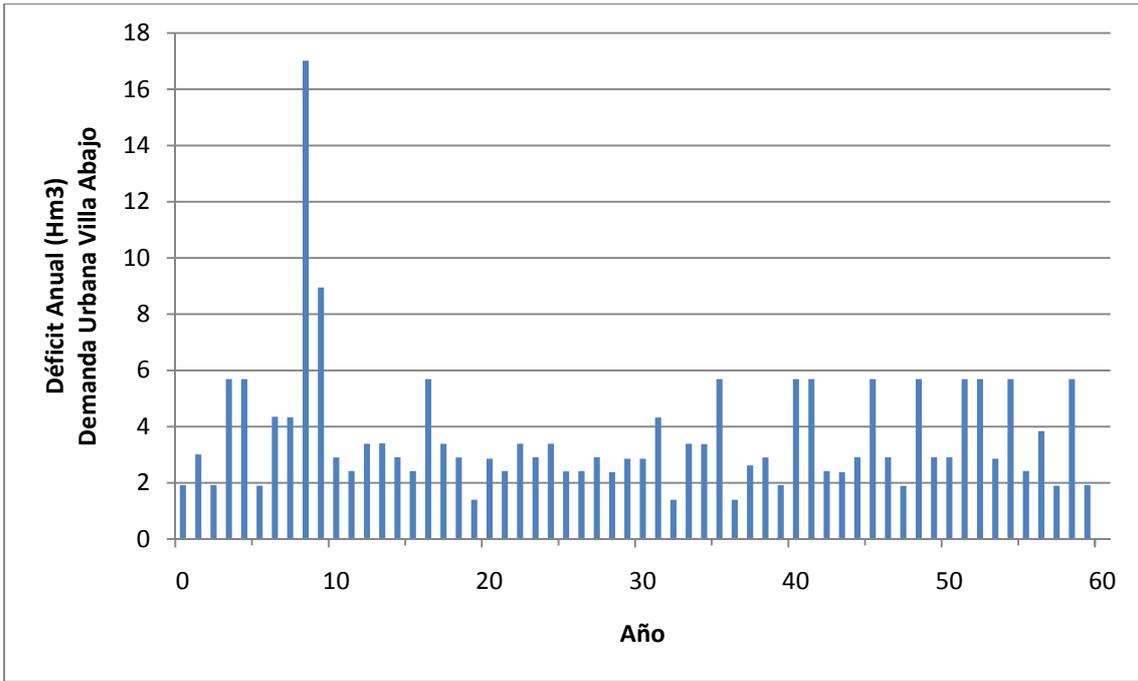


Figura D.20. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Abajo

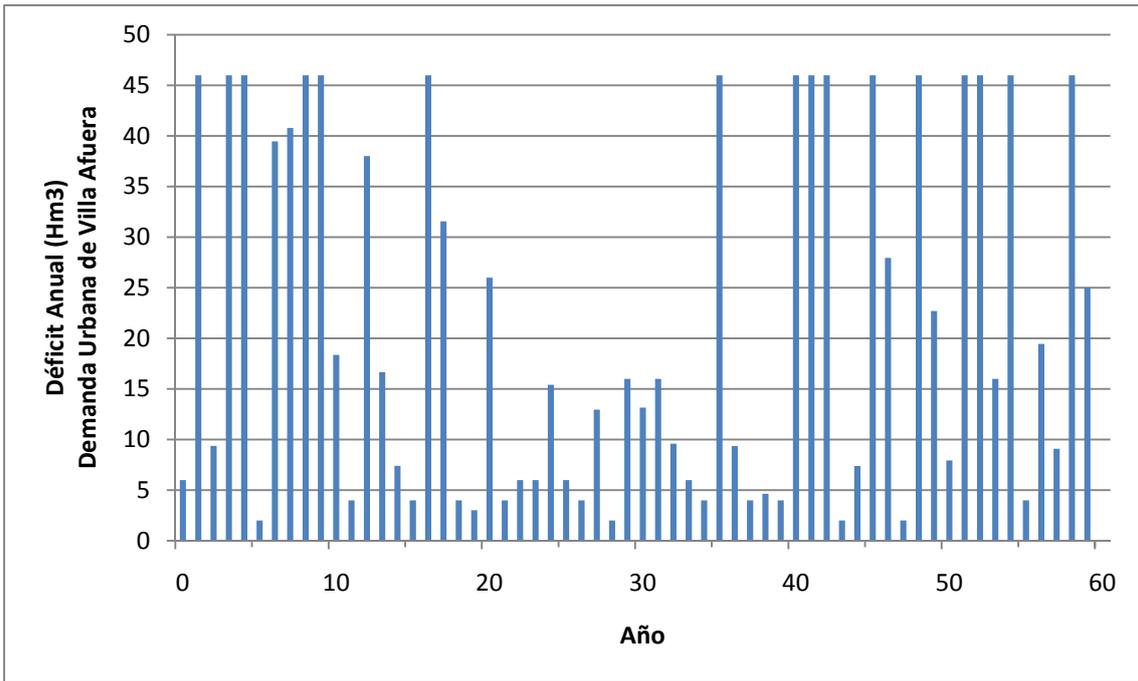


Figura D.21. Déficit Anual de la demanda urbana de Villa Afuera

D.4. Resultados del caso en que el bombeo cubre el 100% de la demanda

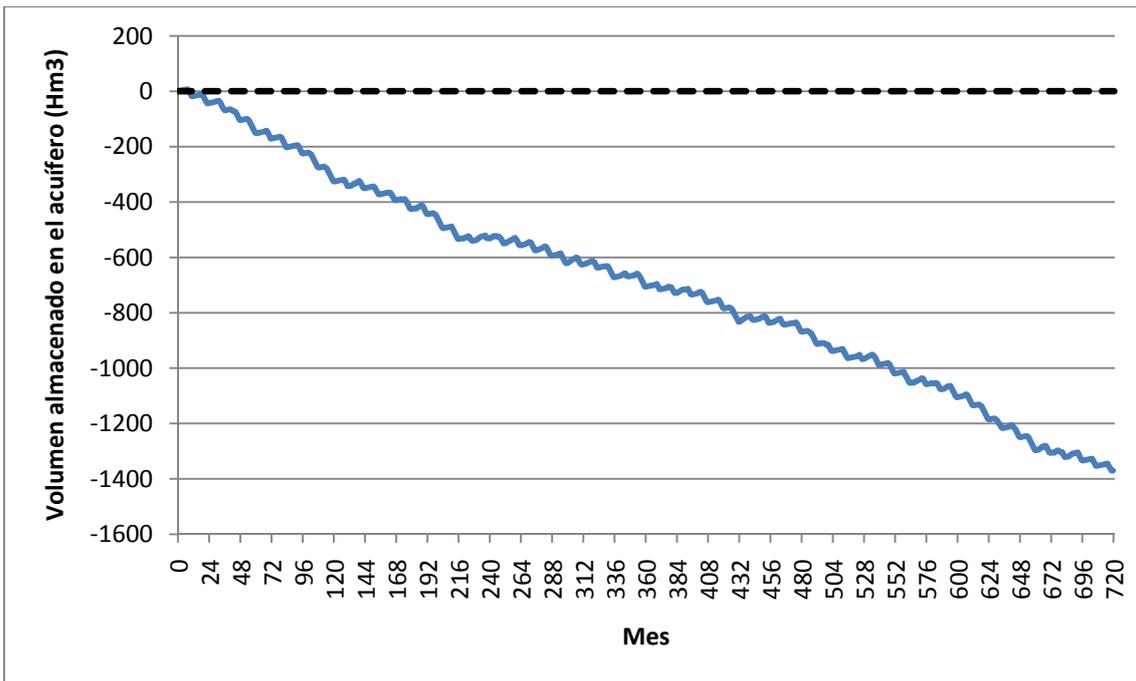


Figura D.22. Volumen almacenado mes a mes en el acuífero

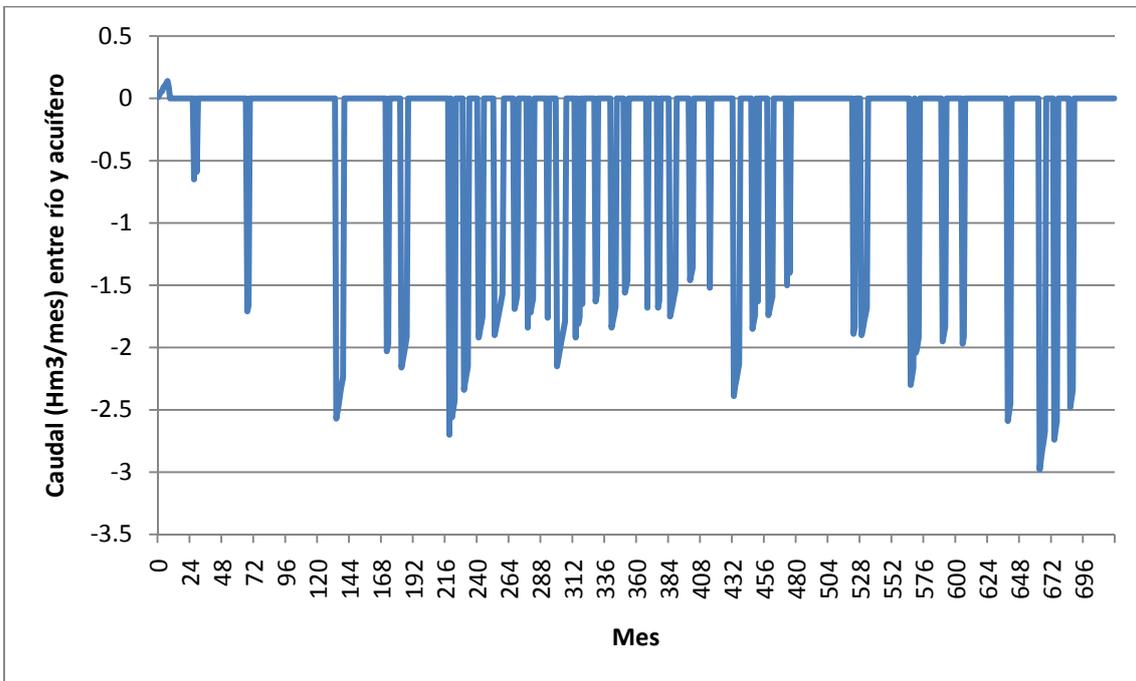


Figura D.23. Caudal entre río y acuífero (positivo del acuífero al río y negativo del río al acuífero)

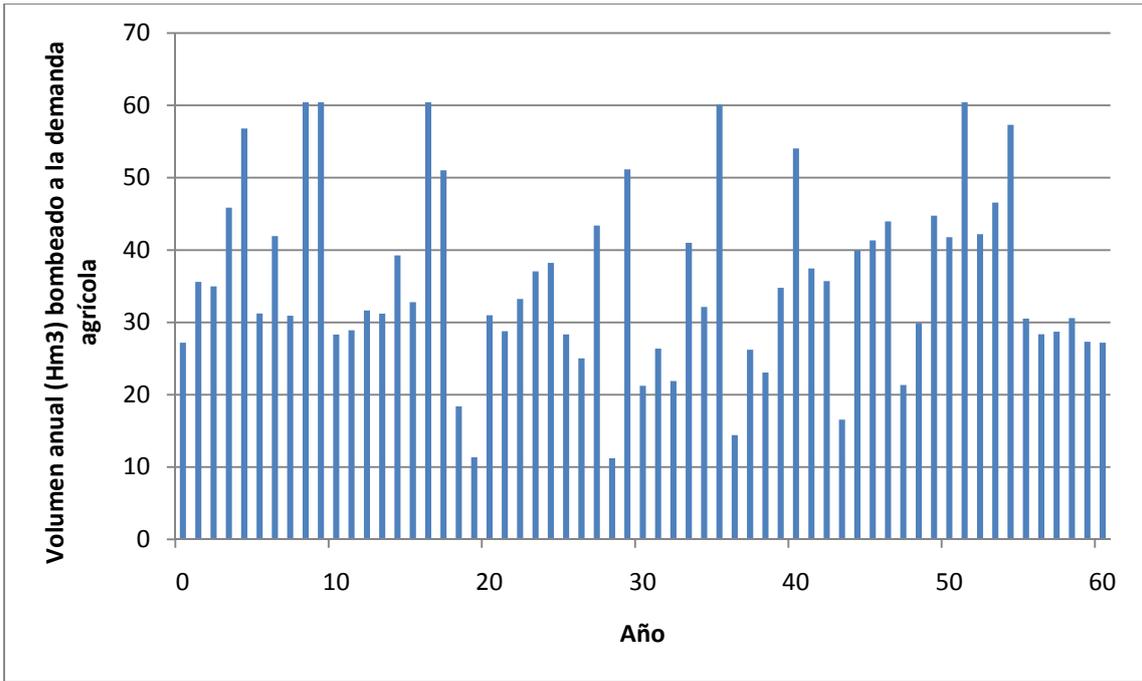


Figura D.24. Volumen bombeado a la demanda agrícola

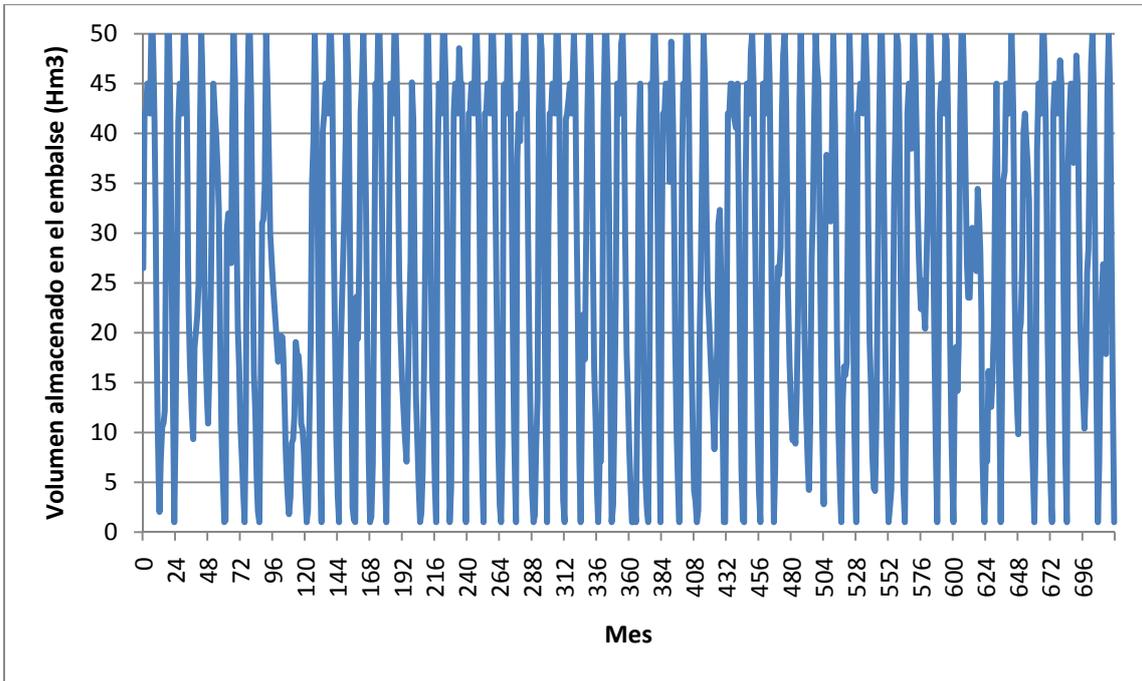


Figura D.25. Volumen mensual almacenado en el embalse

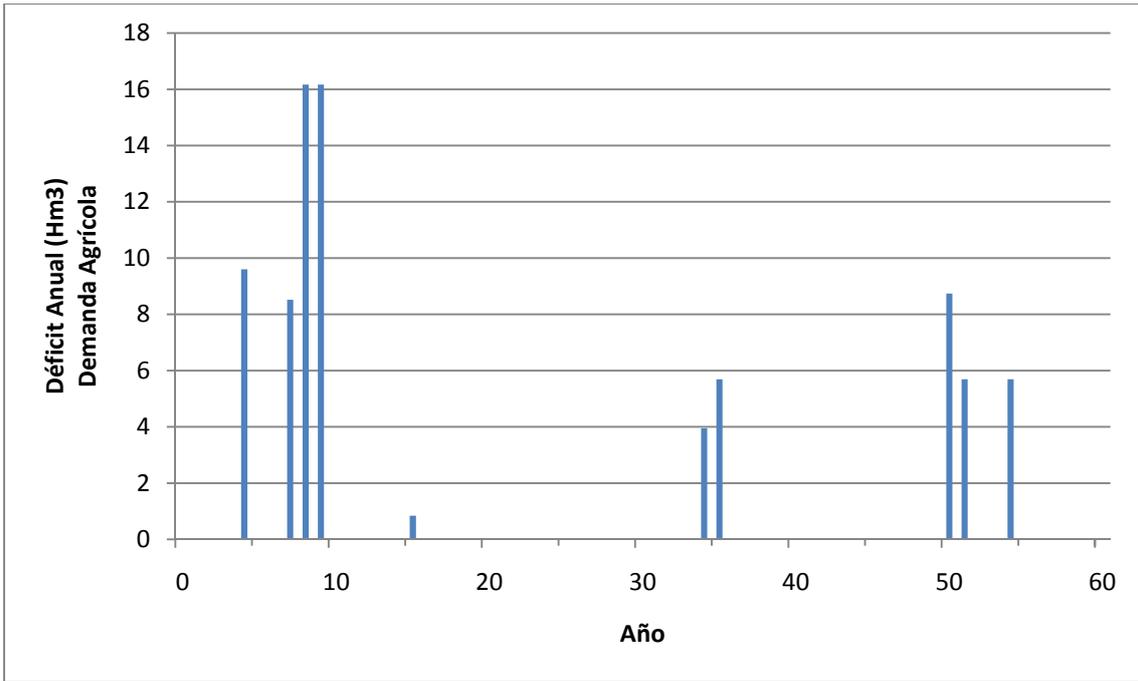


Figura D.26. Déficit anual de la demanda agrícola

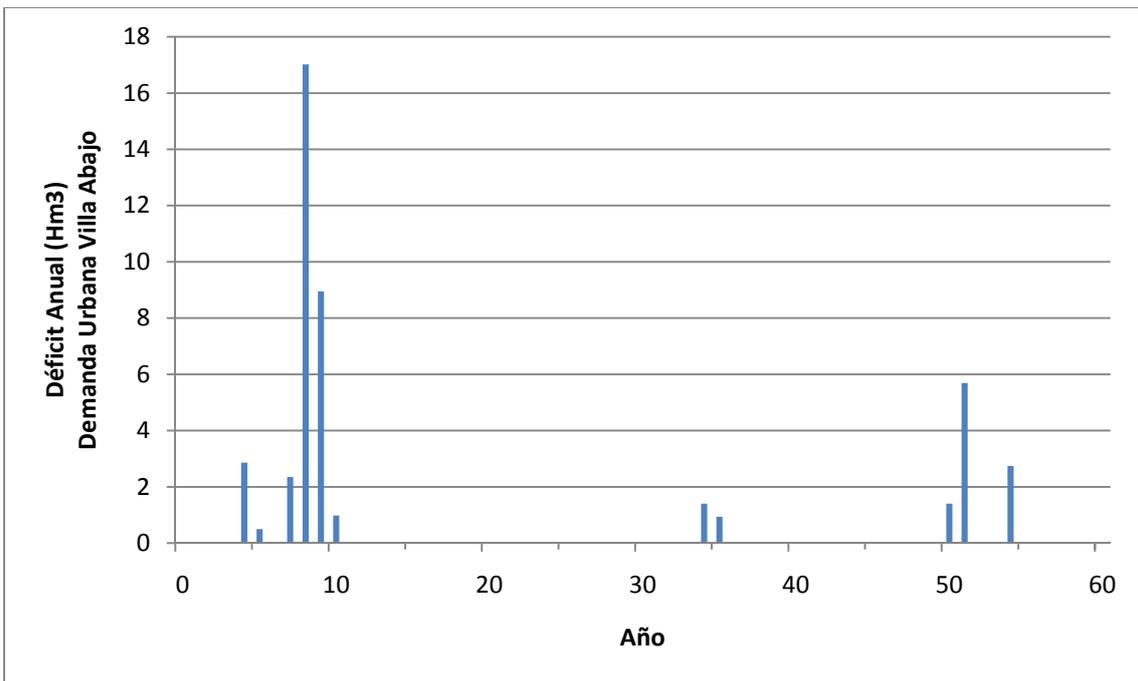


Figura D.27. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Abajo

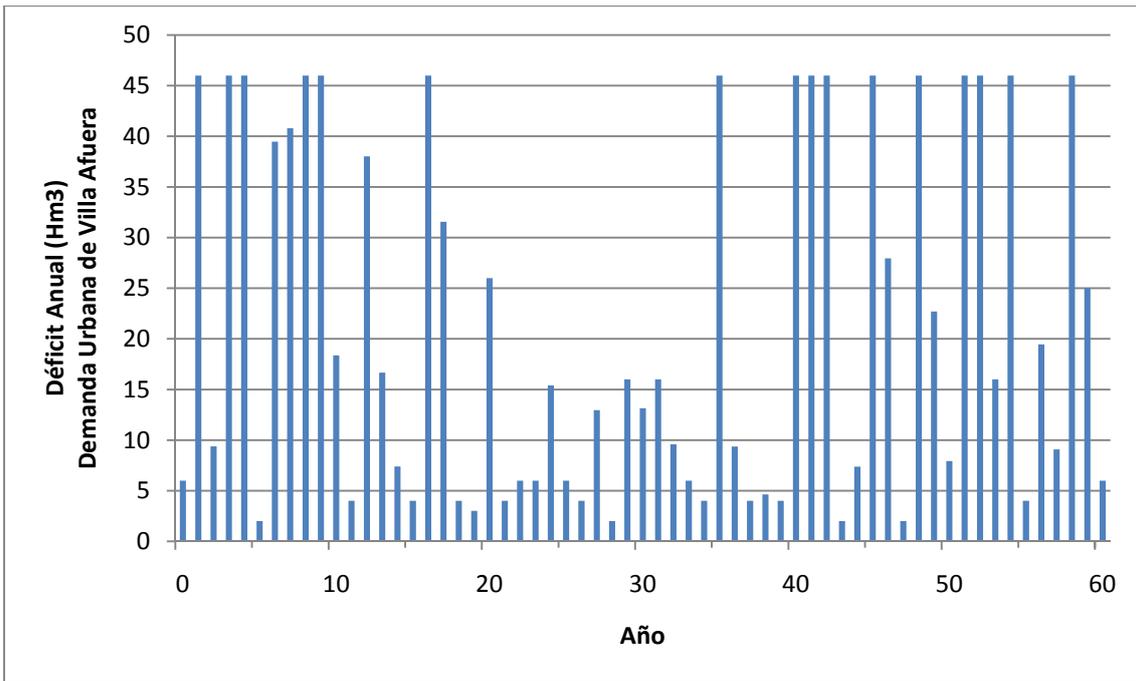


Figura D.28. Déficit Anual de la demanda urbana de Villa Afuera

D.5. Aportaciones del sistema en los cuatro casos

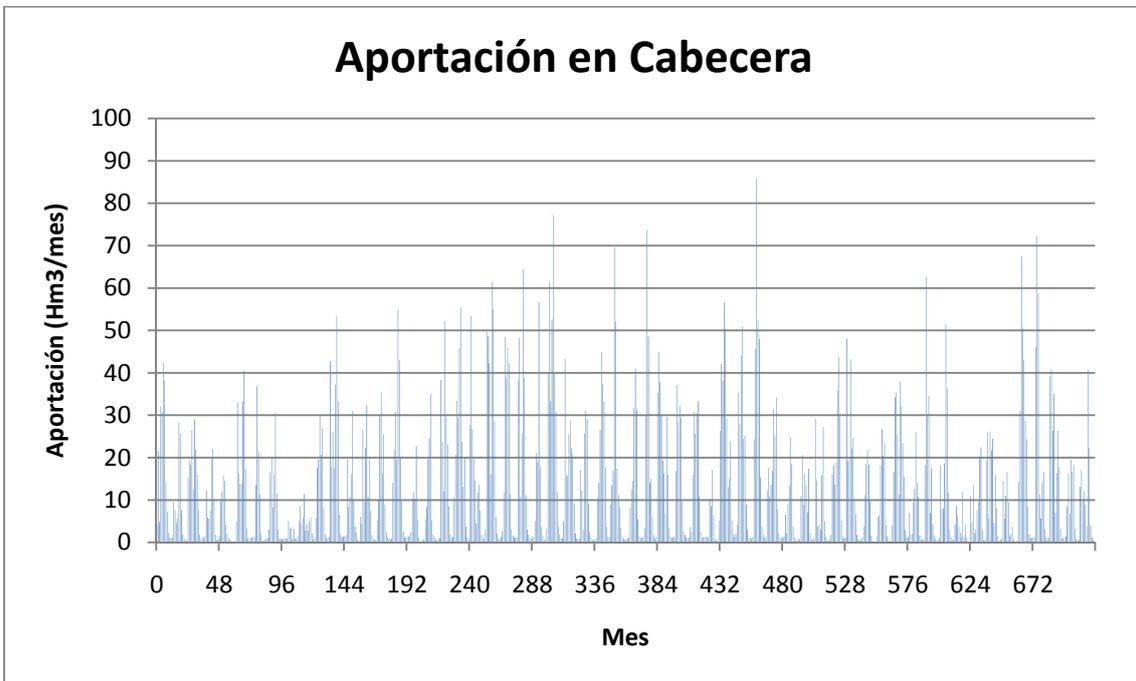


Figura D.29. Aportación en cabecera

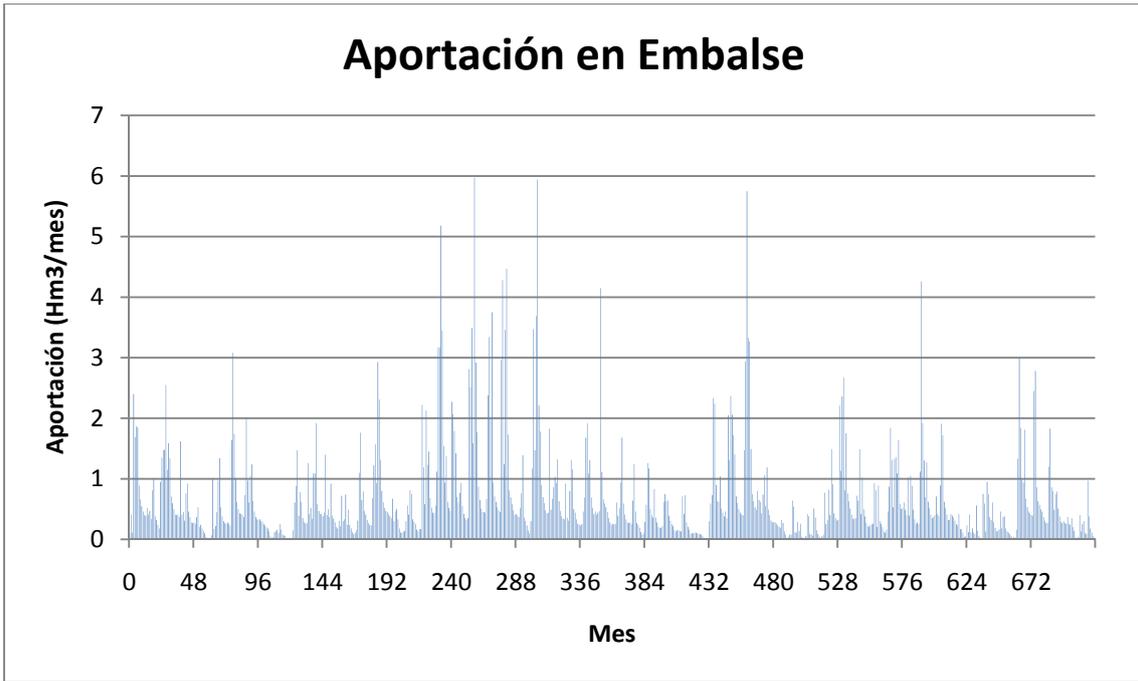


Figura D.30. Aportación en embalse



Figura D.31. Recarga natural del acuífero

Apéndice E. Gráficas de resultados del test de funcionamiento 2 (apartado 5.5.2).

En el apartado 5.5.2 se llevó a cabo la optimización del esquema de recursos hídricos mostrado en la figura 5.5 para comprobar el funcionamiento global del modelo cuando no existen restricciones al uso de bombeos. Al tenerse cuatro posibles niveles de demanda a cubrir con el bombeo, el volumen de resultados es muy alto como para ser mostrado en el texto general. A continuación se reproduce la batería de gráficos resultante de las cuatro ejecuciones del modelo, cada una para uno de los niveles de demanda que pueden cubrirse con el bombeo a la demanda agrícola.

No se incluyen los gráficos correspondientes al volumen del acuífero y a los caudales entre éste y el río dado que ya se han incluido en el texto principal.

E.1. Resultados del caso en que el bombeo sólo cubre el primer nivel de la demanda agrícola (50%)

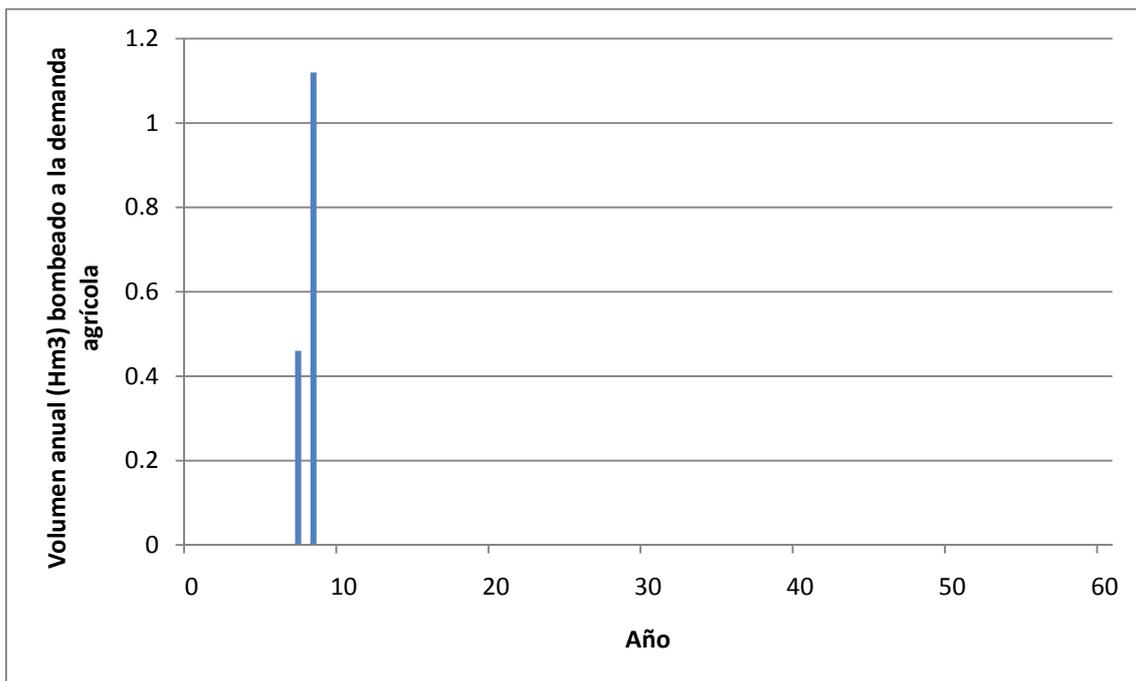


Figura E.1. Volumen bombeado a la demanda agrícola

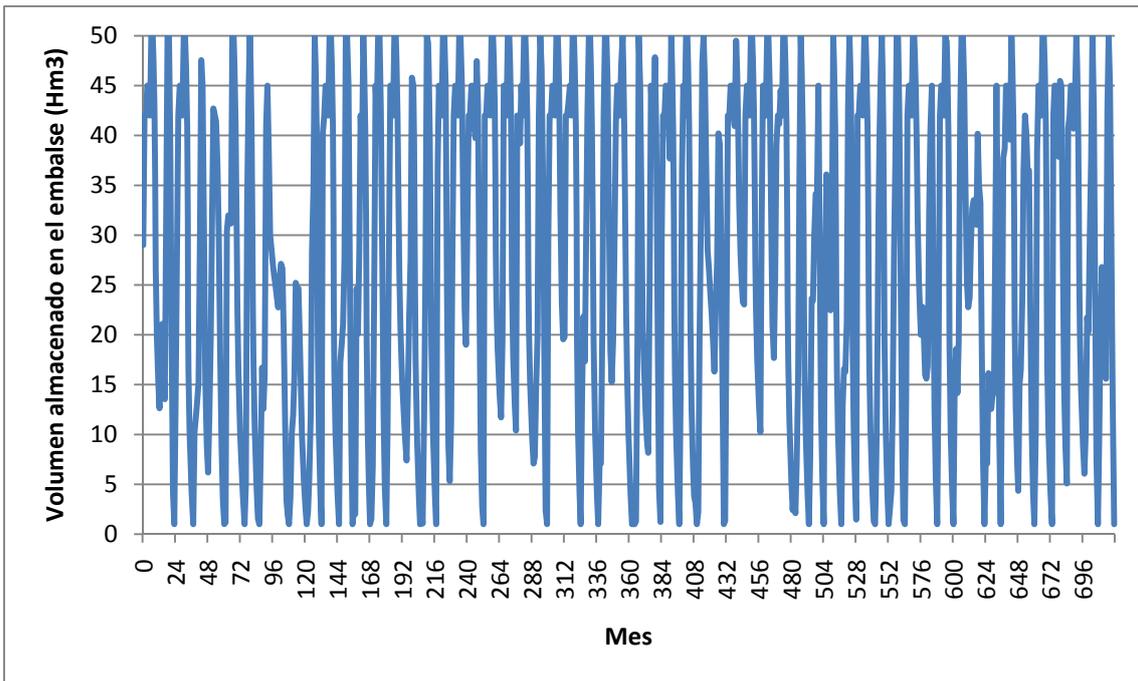


Figura E.2. Volumen mensual almacenado en el embalse

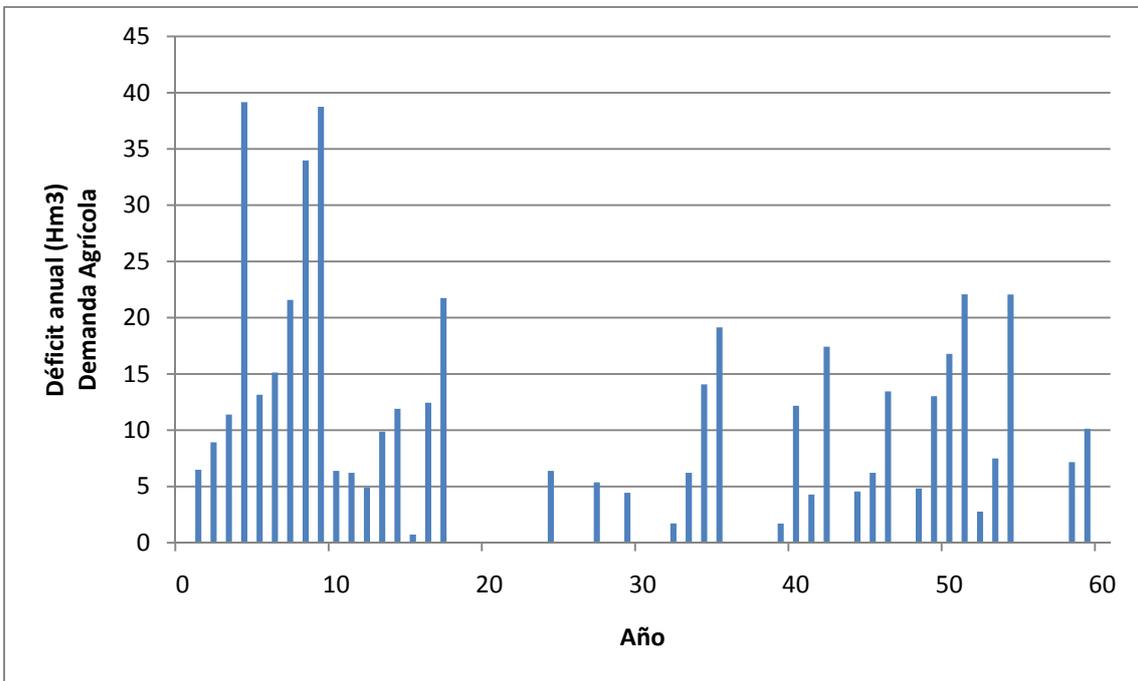


Figura E.3. Déficit anual de la demanda agrícola

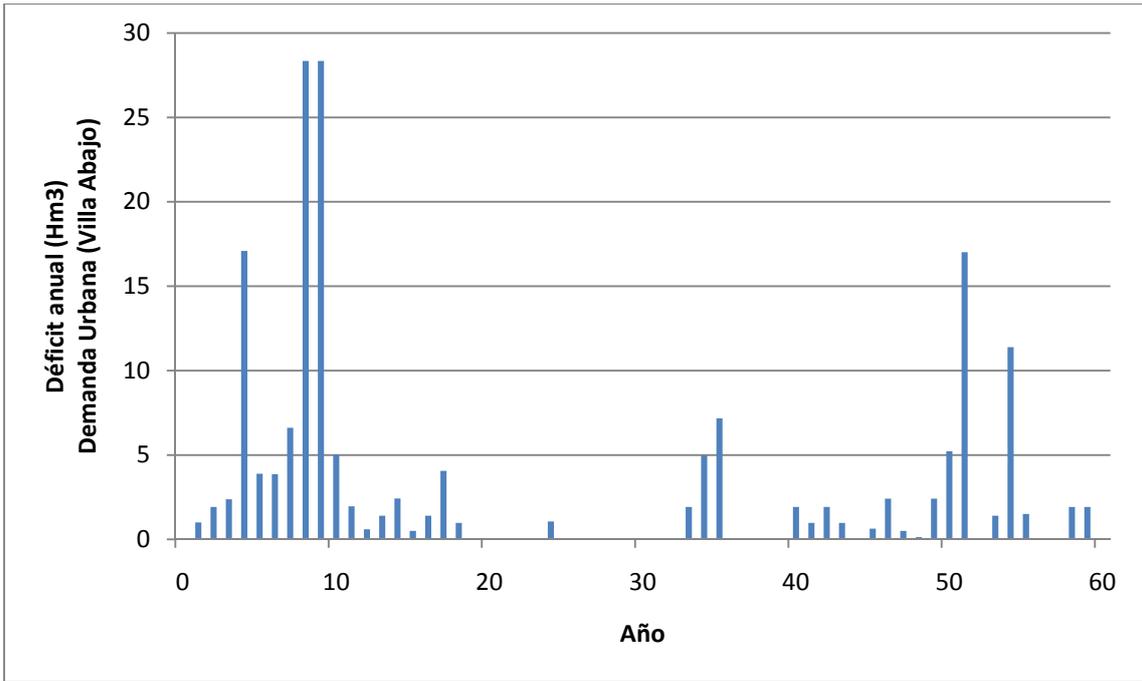


Figura E.4. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Abajo

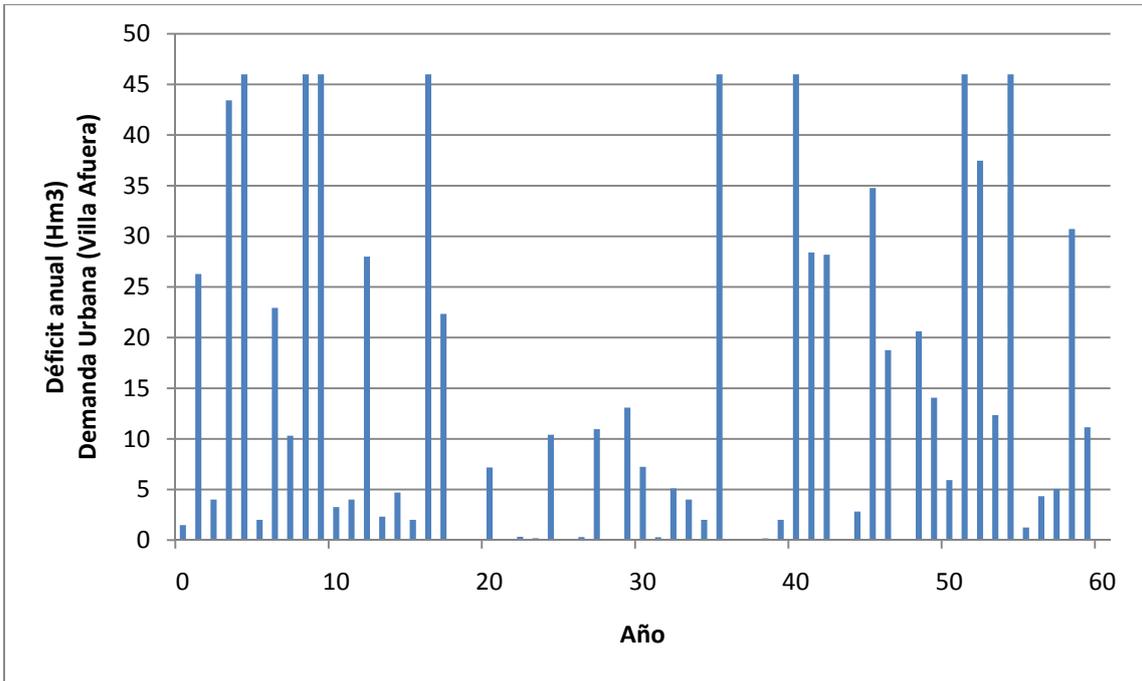


Figura E.5. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Afuera

E.2. Resultados del caso en que el bombeo cubre hasta el segundo nivel de la demanda agrícola (70%)

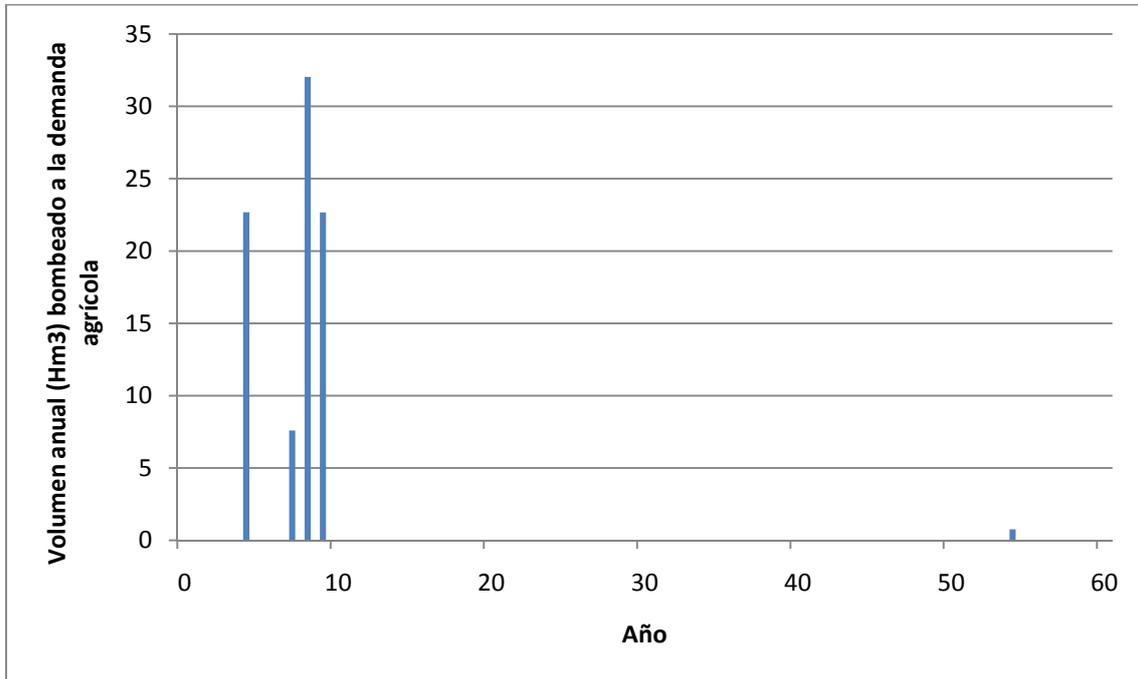


Figura E.6. Volumen bombeado a la demanda agrícola

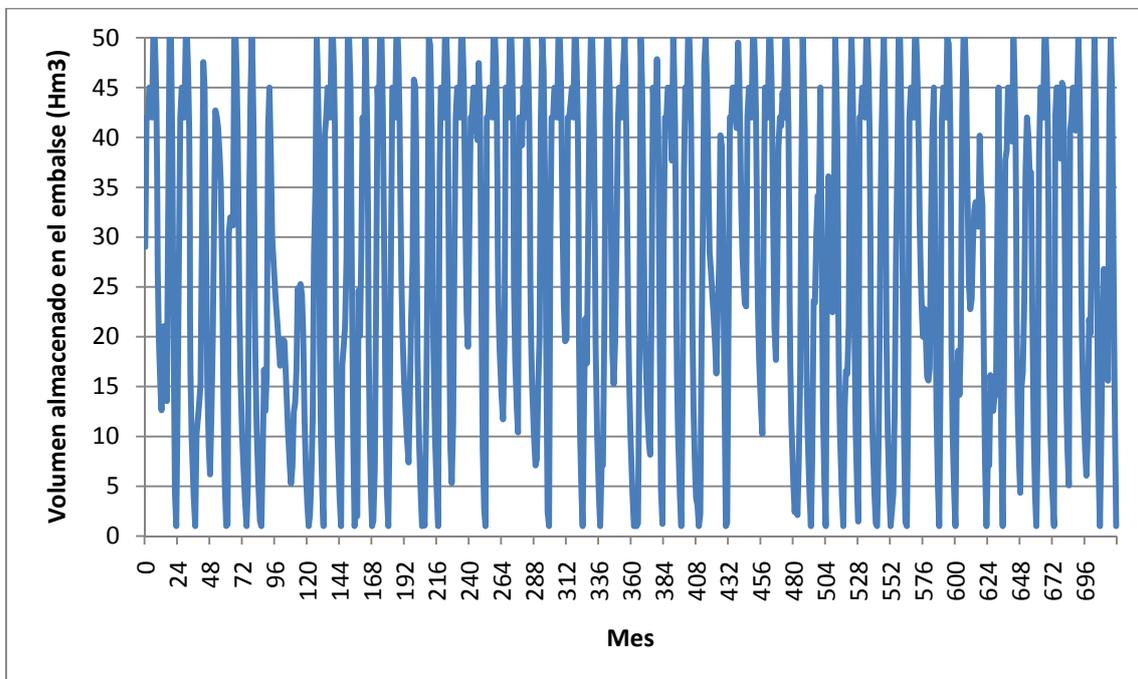


Figura E.7. Volumen mensual almacenado en el embalse

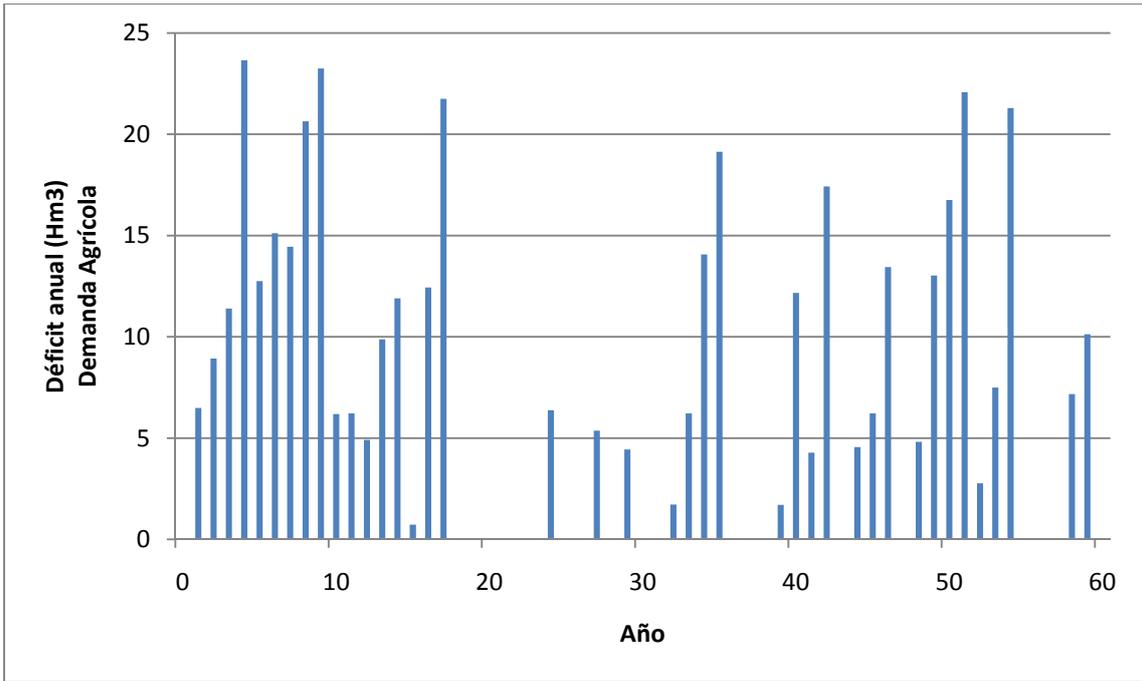


Figura E.8. Déficit anual de la demanda agrícola

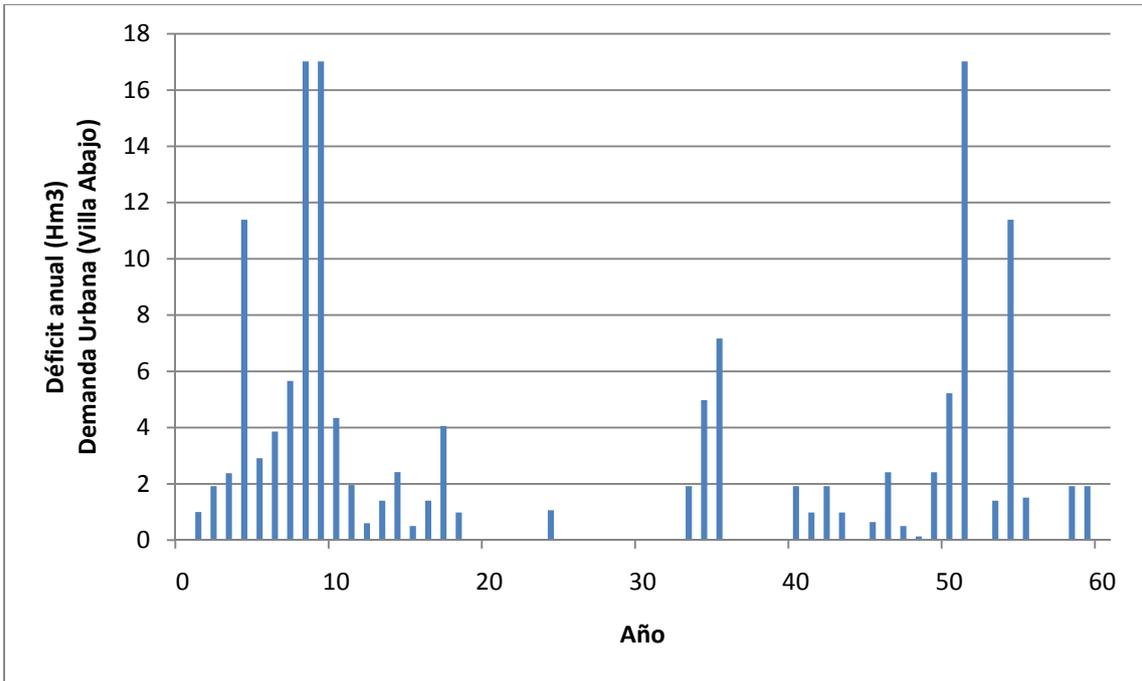


Figura E.9. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Abajo

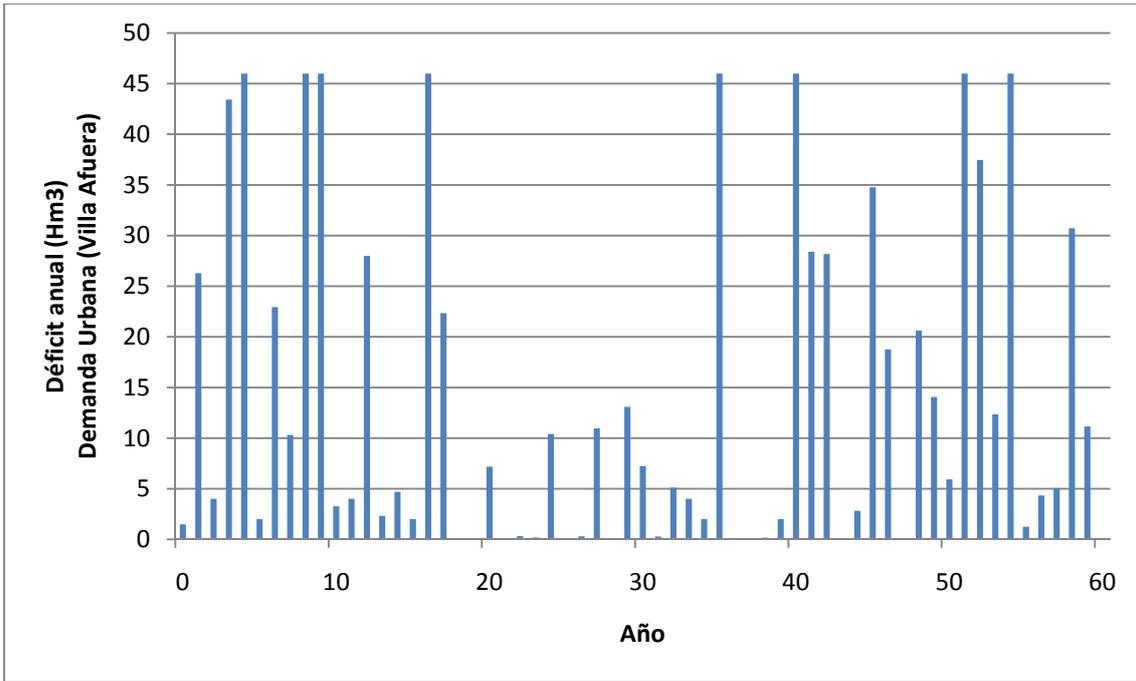


Figura E.10. Déficit Anual de la demanda urbana de Villa Afuera

E.3. Resultados del caso en que el bombeo cubre hasta el tercer nivel de la demanda agrícola (90%)

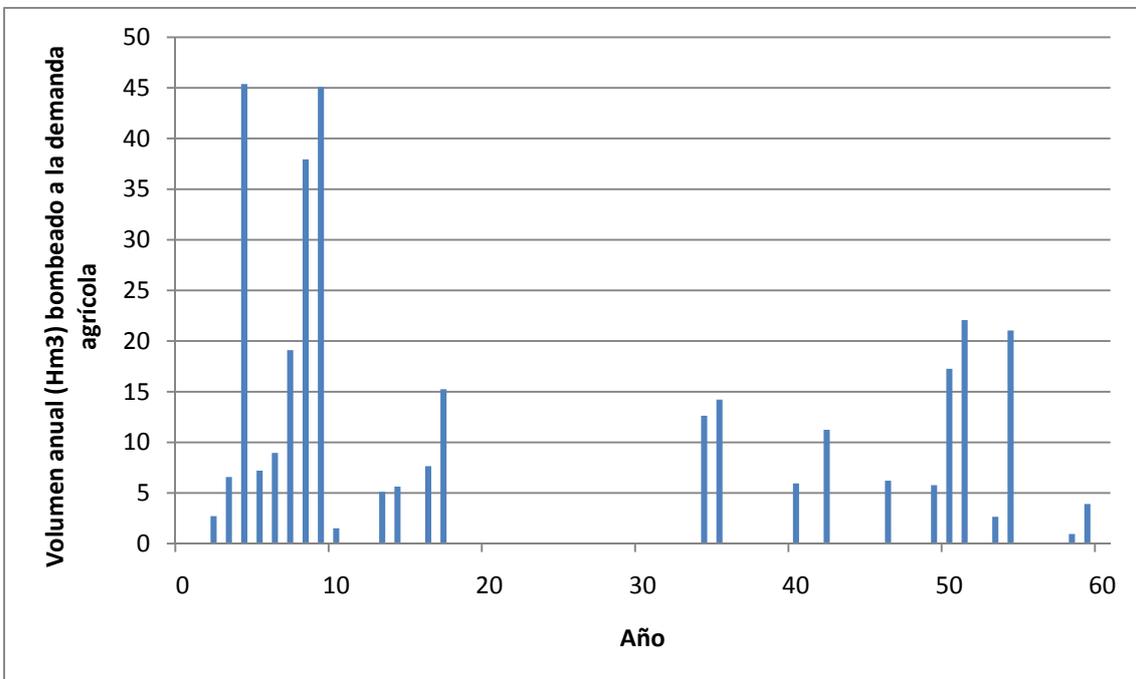


Figura E.11. Volumen bombeado a la demanda agrícola

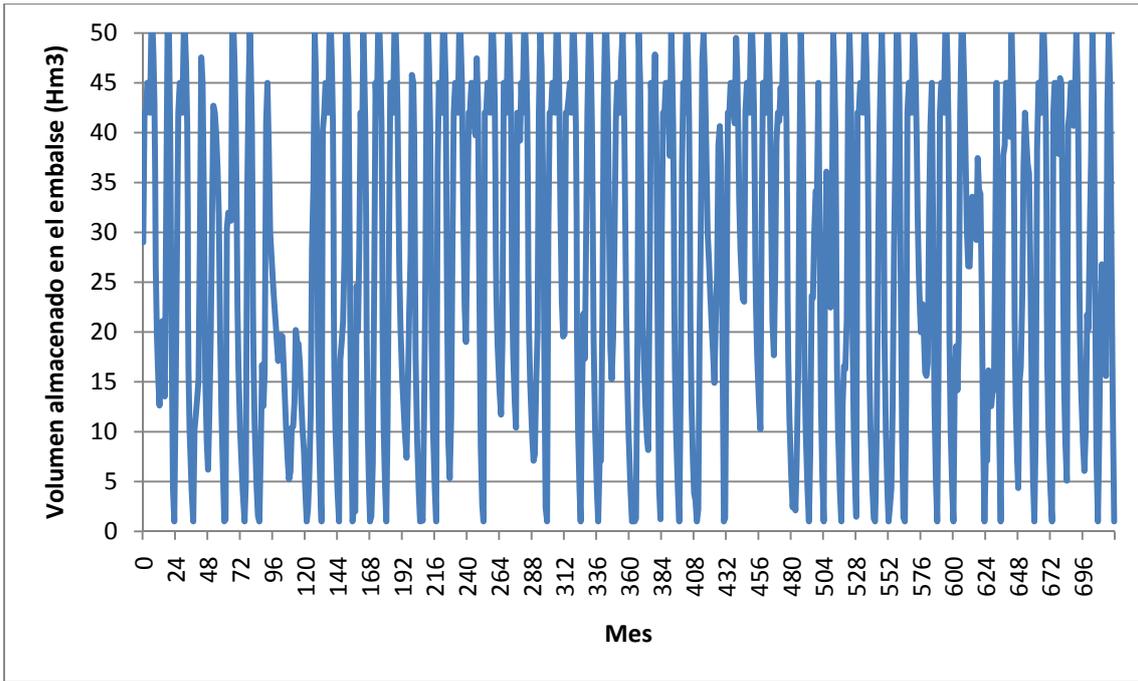


Figura E.12. Volumen mensual almacenado en el embalse

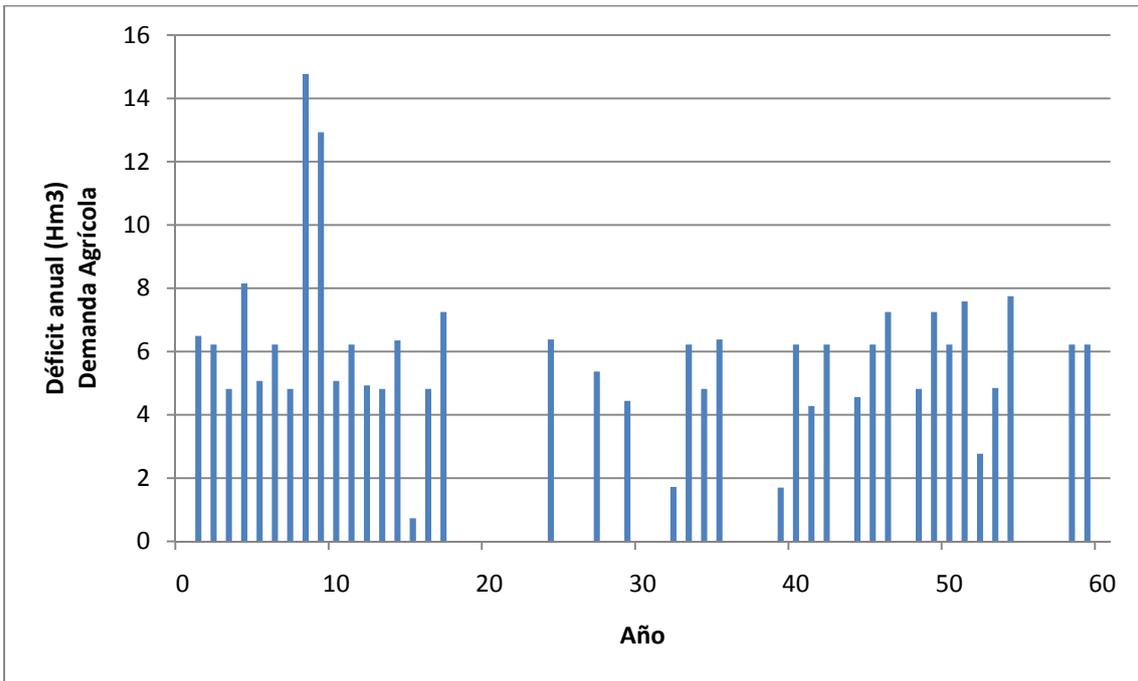


Figura E.13. Déficit anual de la demanda agrícola

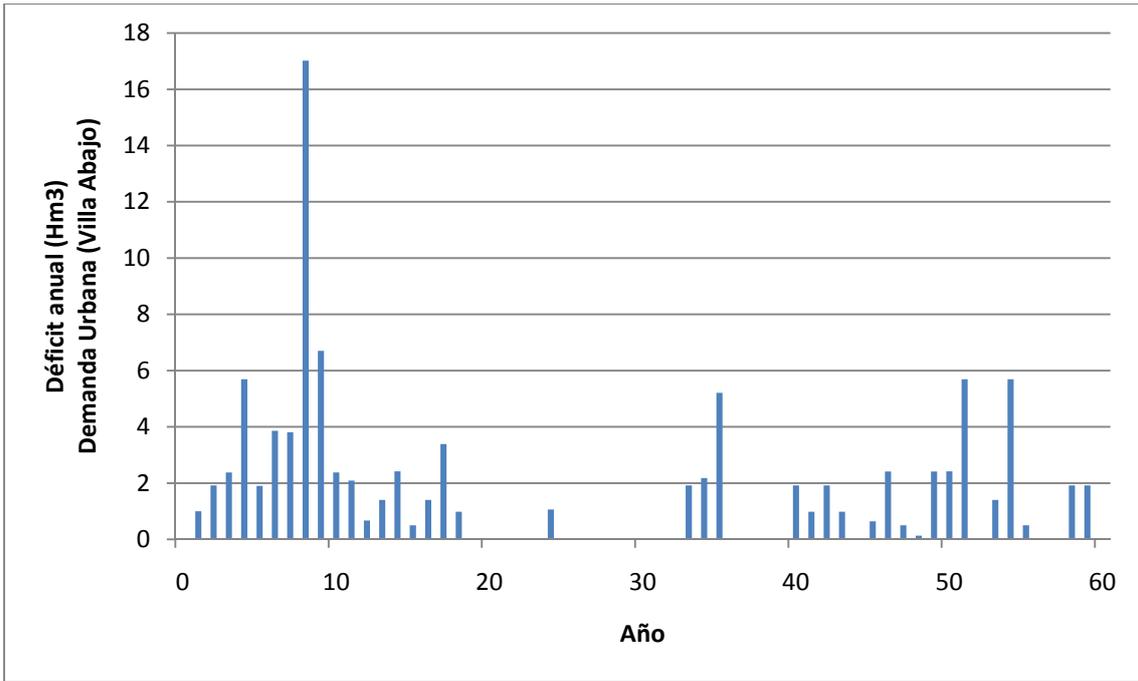


Figura E.14. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Abajo

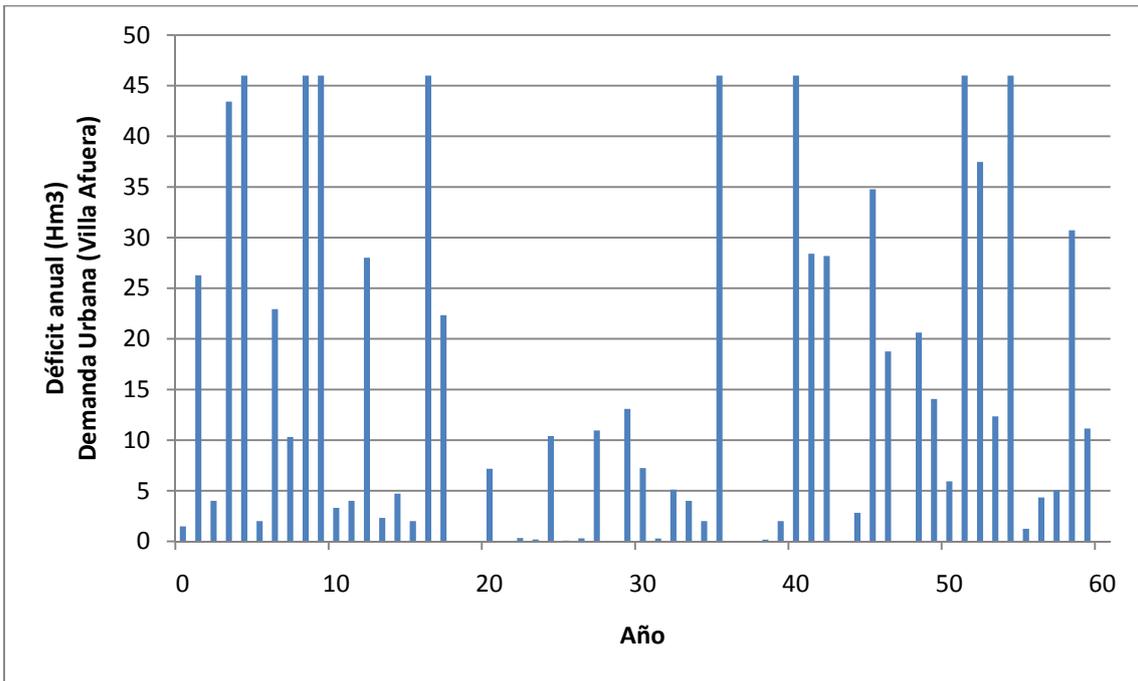


Figura E.15. Déficit Anual de la demanda urbana de Villa Afuera

E.4. Resultados del caso en que el bombeo cubre el 100% de la demanda

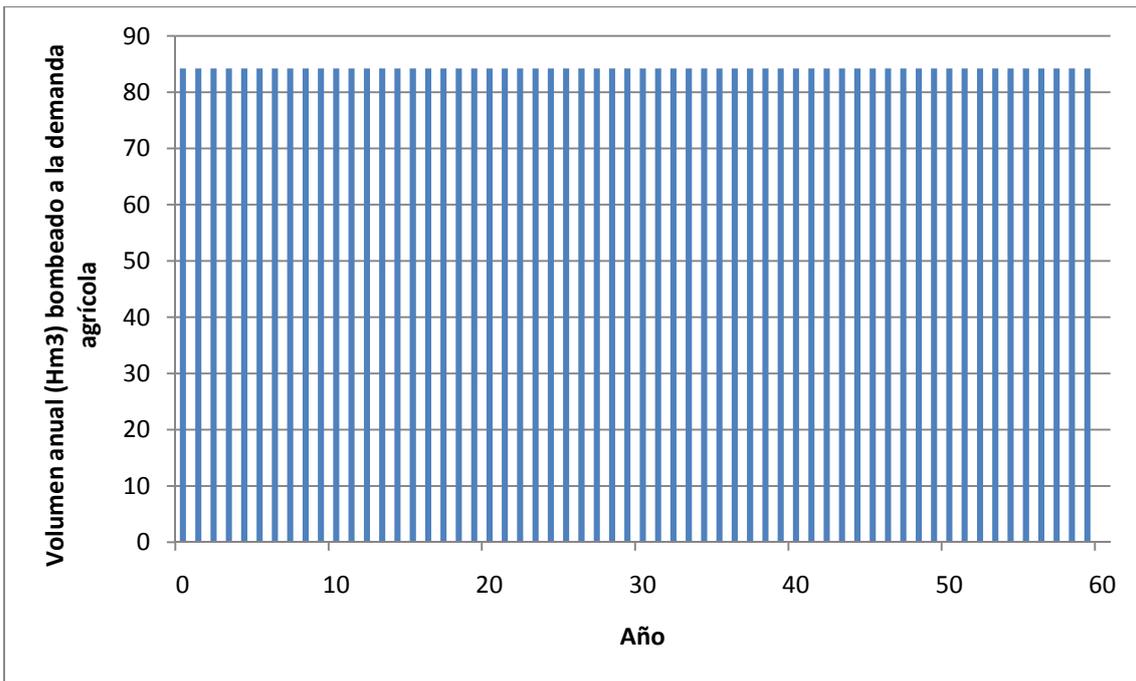


Figura E.16. Volumen bombeado a la demanda agrícola

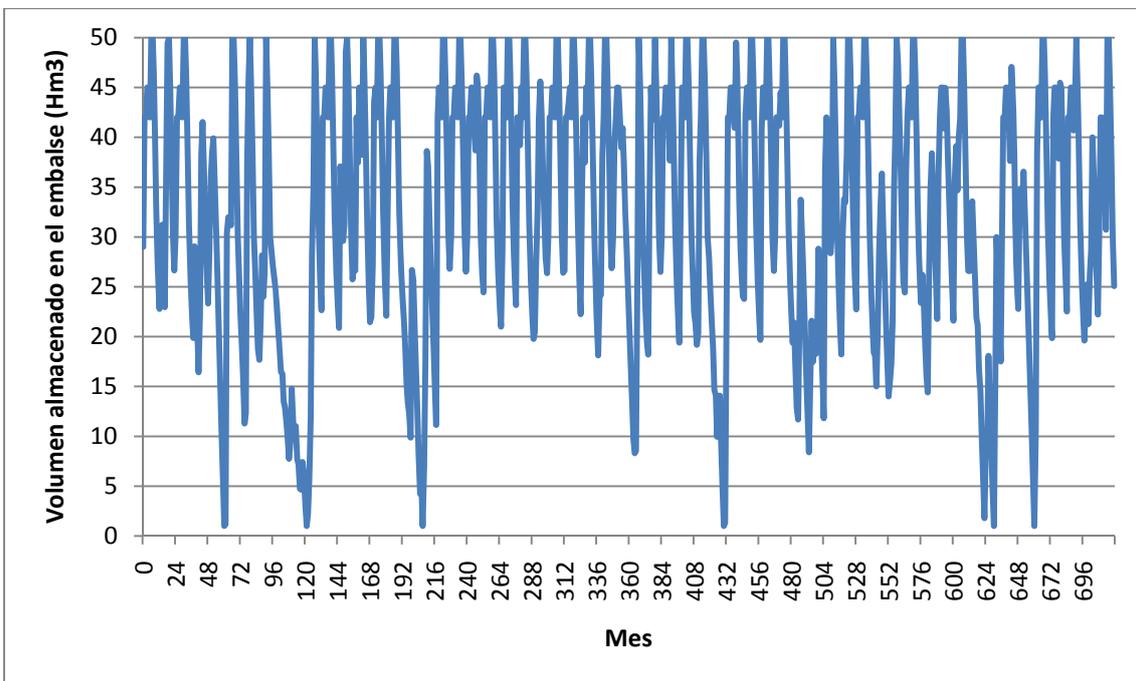


Figura E.17. Volumen mensual almacenado en el embalse

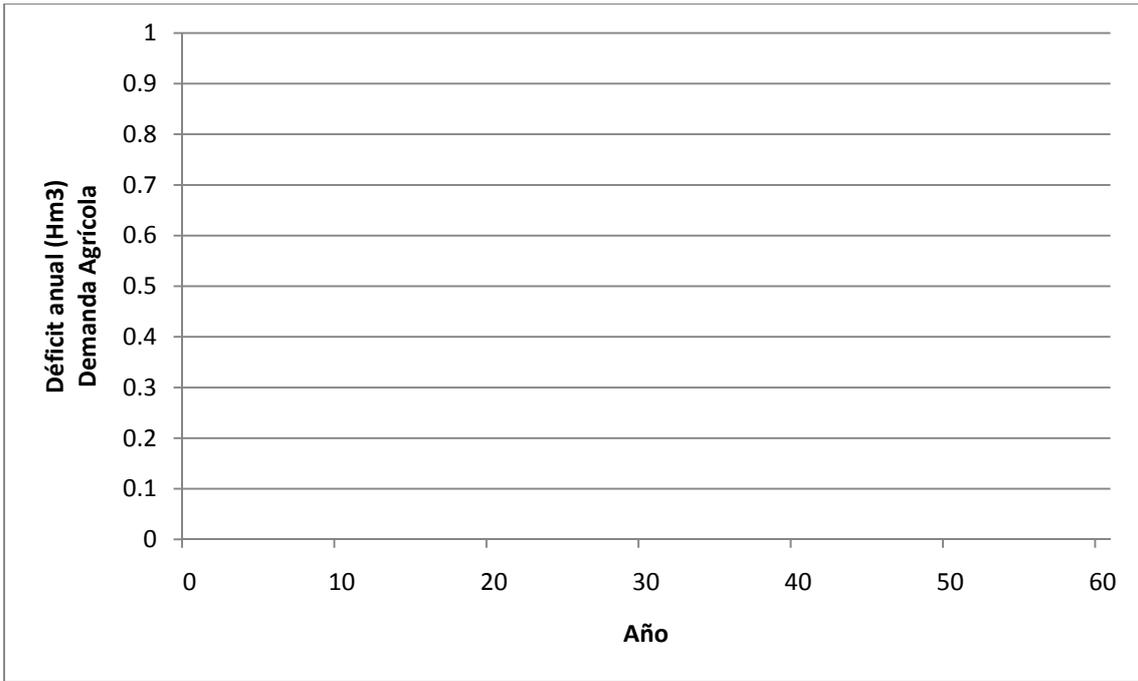


Figura E.18. Déficit anual de la demanda agrícola

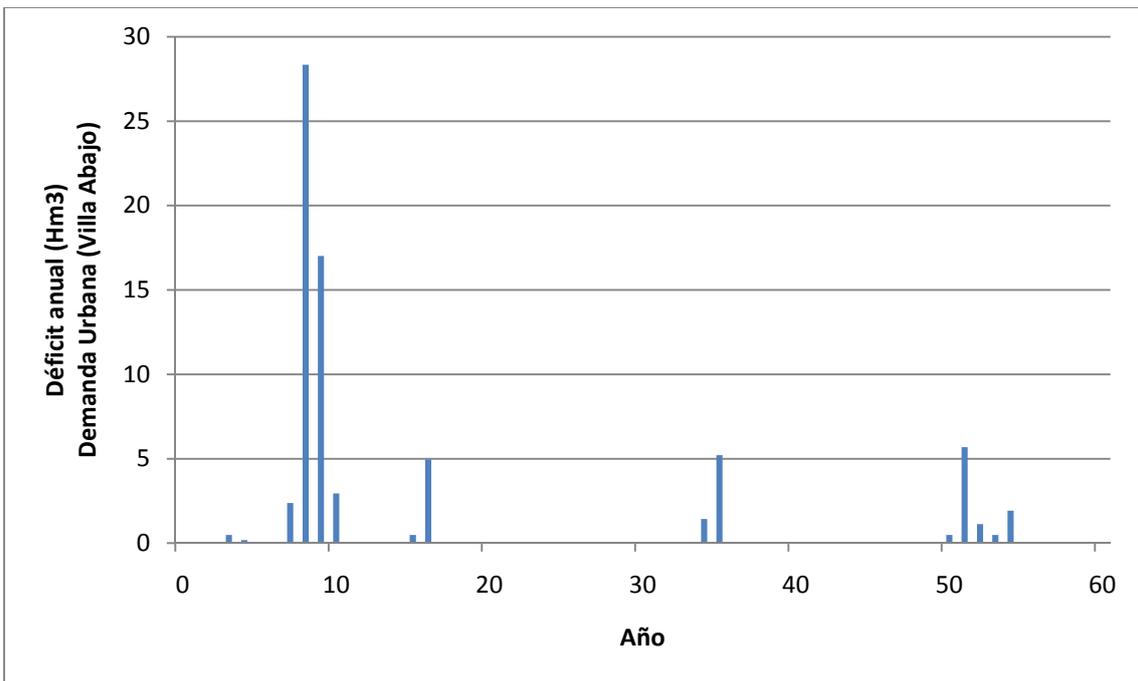


Figura E.19. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Abajo

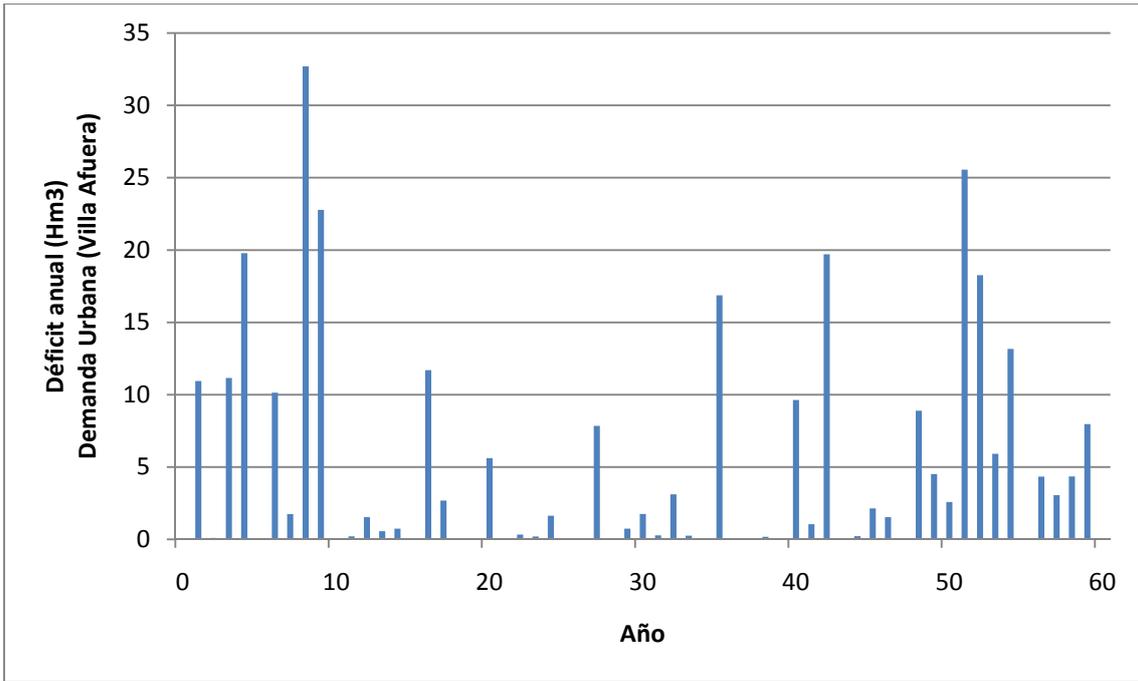


Figura E.20. Déficit Anual de la demanda urbana de Villa Afuera

E.5. Aportaciones del sistema en los cuatro casos

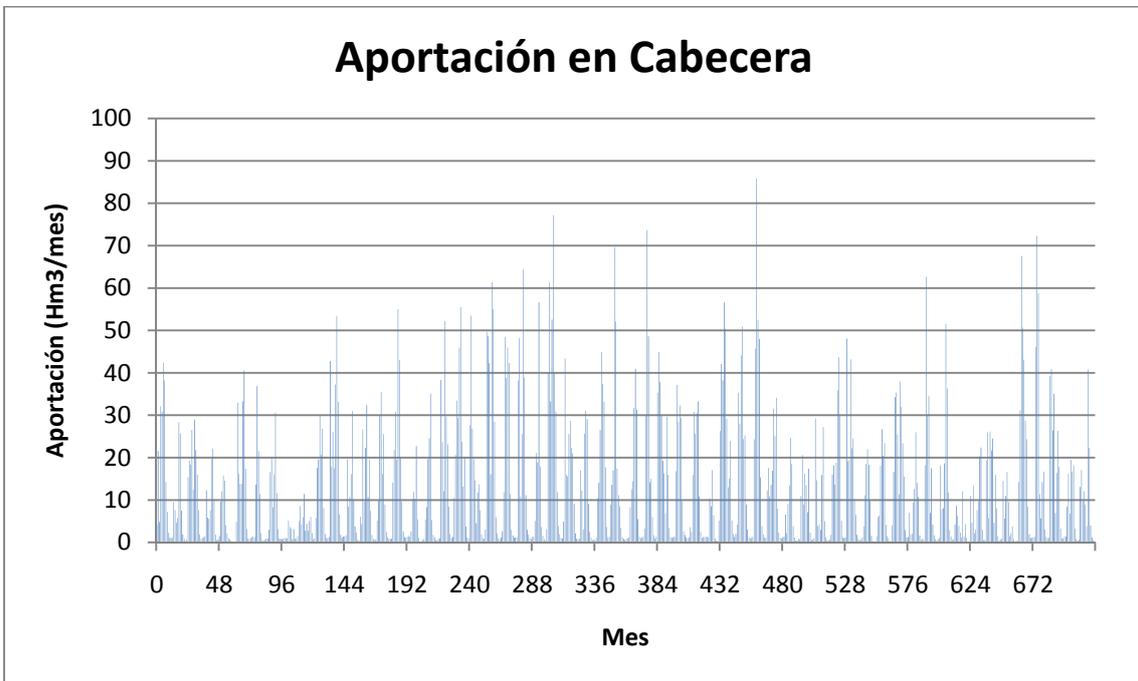


Figura E.21. Aportación en cabecera

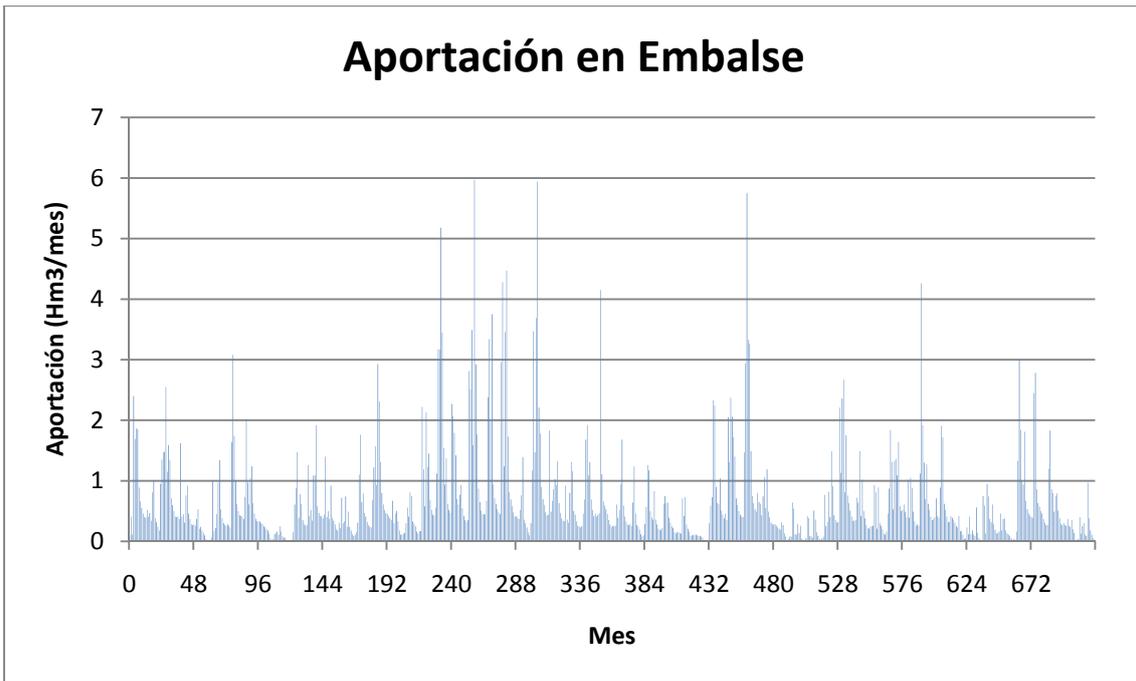


Figura E.22. Aportación en embalse

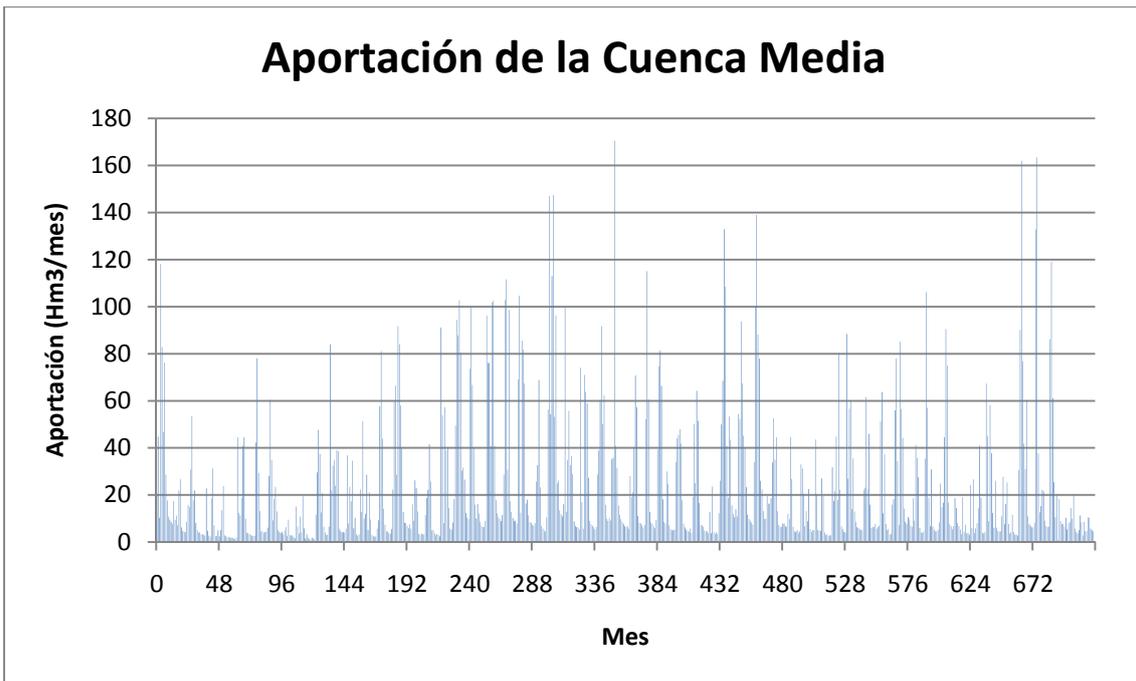


Figura E.23. Aportación de la cuenca media

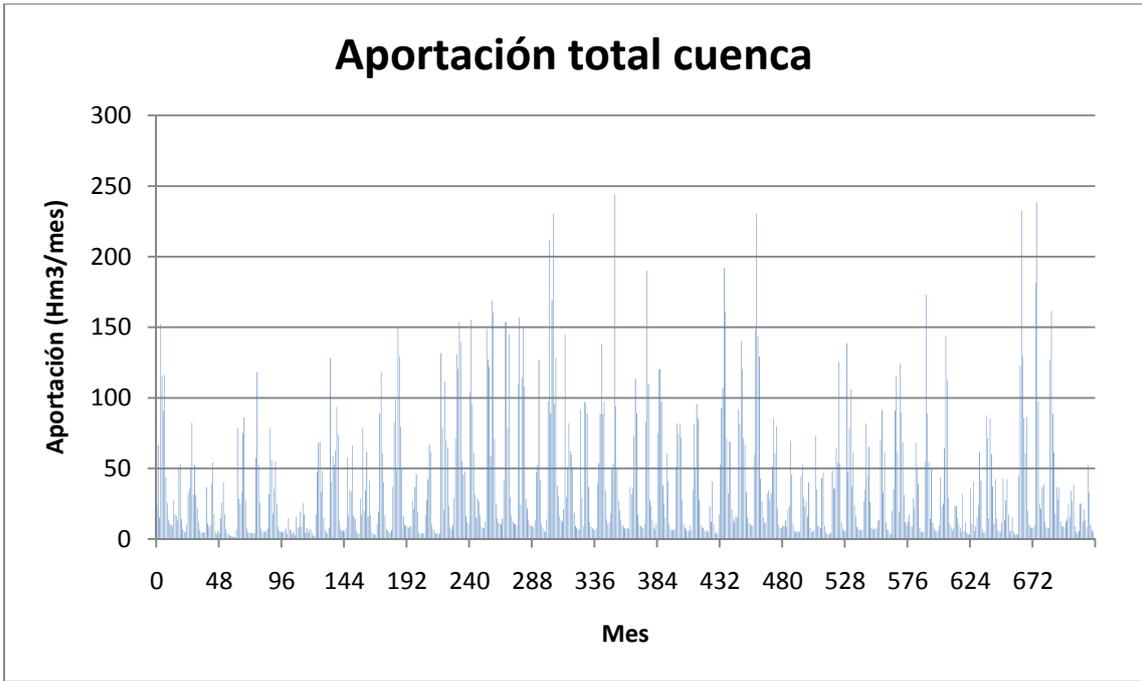


Figura E.24. Aportación total en la cuenca

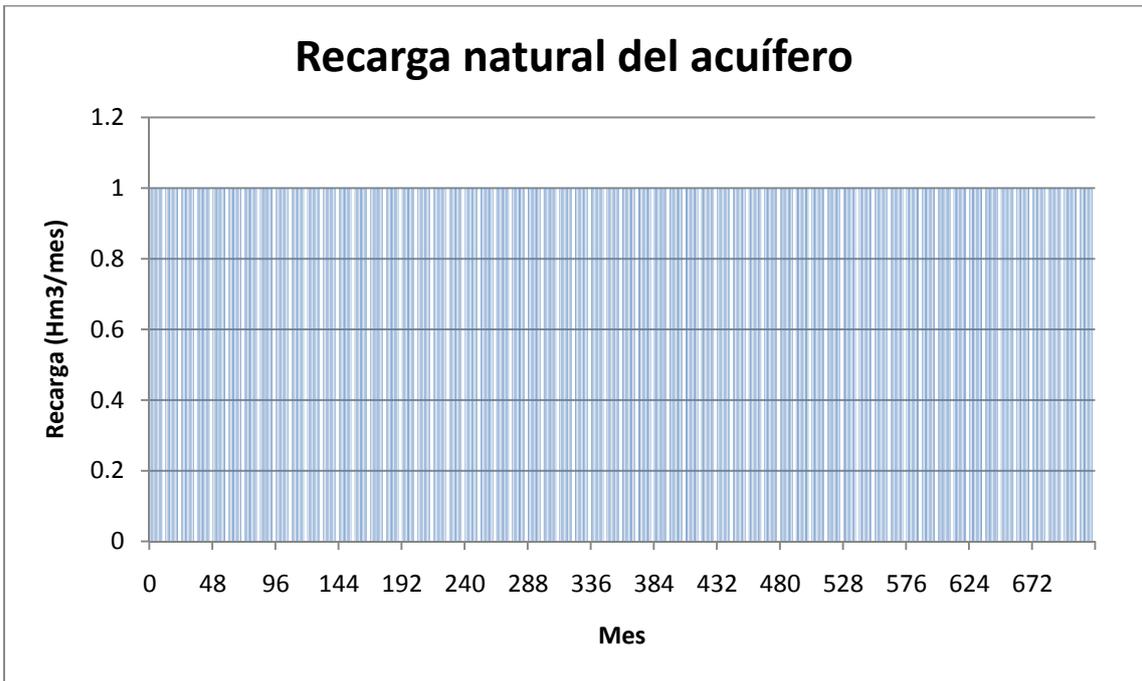


Figura E.25. Recarga natural del acuífero