

TESIS DOCTORAL

**SISTEMA SOPORTE DE DECISIÓN
PARA EVALUACIÓN Y OPTIMIZACIÓN ECONÓMICA
DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS**

Guillermo Collazos

Director: Dr. D. Joaquín Andreu Álvarez

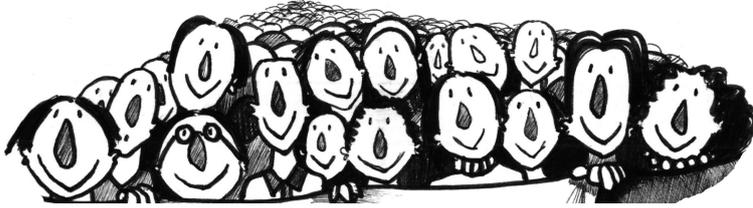
Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente
Universidad Politécnica de Valencia
Valencia - España



Septiembre de 2004



Agradecimientos



Esta es la mejor forma que encontré para no olvidarme de ninguna de las muchas personas que me ayudaron a concretar este trabajo. Esta es la página que escribo con más satisfacción, al poder dar las gracias por la confianza depositada, la palabra de aliento en los momentos difíciles o la mano solícita.

Quiero agradecer a los profesores de la Universidad Nacional de La Plata, en Argentina, que me alentaron y me dieron el impulso necesario para embarcarme en esta difícil empresa: Felipe Borrelli, Aníbal Barbero, Raúl Lopardo y Sergio Liscia. También al resto del personal del Departamento de Hidráulica de dicha universidad, muchas gracias.

Luego, mi agradecimiento sincero a los valencianos y valencianas por la hospitalidad con que me he sentido tratado durante los años que llevo viviendo acá: en tierras españolas me he sentido como en casa.

También quiero agradecer a la Universidad Politécnica de Valencia la posibilidad de ampliar mis estudios en sus aulas y bibliotecas, aprovechando el conocimiento de sus profesores y las instalaciones del campus.

Al personal del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la UPV: profesores, autoridades, secretarios y secretaria, y personal de limpieza y mantenimiento. Especialmente para los profesores más entregados en su labor, como Rafa Bartual, Miguel Rodilla y Juan Marco Segura.

A mi director de tesis, el profesor Joaquín Andreu Álvarez, por la ayuda económica brindada en los comienzos de este trabajo, por su buena disposición para conmigo, y por dejarme estar en su grupo de trabajo.

A los compañeros de doctorado, por los momentos compartidos y la colaboración mutua. En particular a los amigos de la ronda de mate: Illona, Carles, Adriana, Marino, Juan José, Ricardo, Amparo, Andrés, Delba, Yesid, Paco, Carolina, Jorge, Nacho y

Patricia, y muchos más, por los buenos momentos compartidos en ese oasis de media mañana.

Mención aparte merece el especial y permanente agradecimiento para tres amigos y compañeros: Eduardo F. Cassiraga, Silvia Falco y Julián Vélez Upegui, por su ayuda permanente e incondicional.

A los compañeros y ex-compañeros de despacho: Manolo, Camilo, Enrique, Raúl, Javi, Leonardo, David, Nacho, Gabriel, Alba, Álvaro, Miguel, Roberto, Dávide, Luciana y algunos más, por la cantidad de horas compartidas frente a nuestras respectivas computadoras. A los informáticos Miguel y Carlos, por la ayuda con los virus y otros problemas de esa clase.

A Ángel Villalobos, Eduardo Triana y Raúl Rivas, por las correcciones y útiles sugerencias del texto de este trabajo. A Abel Solera por su imprescindible ayuda en la adaptación del programa SimGes a uno de los nuevos módulos desarrollados.

También quiero agradecer la colaboración de la Confederación Hidrográfica del Júcar, en las personas de Teodoro Estrela y Miguel Ángel Pérez, por los datos facilitados para el caso de aplicación.

A Griselda por los dibujos artísticos con que empieza y termina esta tesis.

En el importante aspecto financiero quiero agradecer especialmente la beca predoctoral de la Generalitat Valenciana que ha costado la mayor parte de este trabajo; y en menor medida a los proyectos del Ministerio de Ciencia y Tecnología (DGI-SGPI, proyecto REN2002-03192) y de la Comisión Europea (programa Interreg IIIc, proyecto SEDEMED).

También quiero reconocer a los distintos compañeros y compañeras de piso, por la comprensión de mis peores defectos y por los gratos momentos de convivencia.

A mis amigos de Ki-Aikido de Valencia por los ánimos. A Rafa, Fina, y los chicos no tengo palabras para agradecerles su amistad y cariño, sentimiento que desde luego es recíproco. Hay sido y serán mi familia en tierras valencianas.

Y por supuesto —aquí sobran las palabras— a mis viejos y mis dos hermanas, apoyos incondicionales a la distancia, a quienes dedico este trabajo.

Resumen

En las últimas décadas se han agravado los problemas de aguas en casi todo el planeta. Las causas de este proceso son bien conocidas: mientras que el agua dulce es un recurso finito y vulnerable; hay un sostenido incremento del uso por parte de la sociedad (por la cultura del consumo), un aumento de las presiones contaminantes, y los efectos del cambio climático se dejan sentir con mayor intensidad.

Esta creciente escasez de agua útil, hace que los métodos y formas de gestión empleados tradicionalmente —mientras el agua era abundante— ya no sean adecuados. Los nuevos criterios deben gestionar la escasez de forma racional y sostenible, ya que no se está ante eventos esporádicos de sequía, sino ante una situación estructural con la que hay que convivir de ahora en adelante. La economía estudia el empleo de los recursos escasos, y por ello tiene mucho que aportar para elaborar y precisar estos nuevos criterios. La idea central de esta tesis es incorporar la visión, los métodos y criterios económicos en la tarea de gestionar y planificar el uso y conservación de los recursos hídricos.

En esta tesis doctoral se han desarrollado dos modelos o programas informáticos para realizar análisis económicos en sistemas de recursos hídricos. Ambos son programas genéricos, aptos para ser empleados en casi cualquier cuenca o sistema de recursos hídricos, y funcionan coordinadamente con el Sistema Soporte de Decisión (SSD) AQUATOOL, desarrollado previamente en el DIHMA de la Universidad Politécnica de Valencia.

El programa EcoGes realiza la asignación del agua cruda de forma económicamente eficiente, repartiendo el agua con criterios de mercado. El programa considera la hidrología, las infraestructuras o condicionantes físicos y los costos de movilización o disposición a pagar por el uso del agua, para distribuir el recurso entre los usuarios a lo largo del tiempo. Internamente se optimiza una función no-lineal separable de beneficio neto en una red de flujo.

El programa MEvalGes realiza múltiples evaluaciones económicas de la asignación actual, obteniendo indicadores económicos que permiten detectar situaciones altamente ineficientes o de despilfarro en el empleo del recurso, como paso previo y necesario para emprender medidas correctoras. En este caso la valoración del agua no determina la asignación, sino que ésta se realiza con los criterios actualmente en uso.

Para el uso de estos programas es menester valorar el agua destinada a distintos usos. Esta valoración constituye un área importante de conocimiento, y llevarla a la práctica una tarea compleja y con incertidumbres importantes, pero necesaria. Se hace una revisión de las metodologías disponibles y posteriormente, en el caso de aplicación, se obtienen curvas de demanda. La especial dedicación puesta en esta tarea no puede suplir, evidentemente, la carencia de datos, por lo que este aspecto queda abierto a mejoras ulteriores.

La aplicación de estos programas a distintos casos reales y complejos (Plan Hidrológico Nacional de España y cuenca del río Júcar) permitió analizar y comparar distintas hipótesis y propuestas, recomendando actuaciones a emprender. Los resultados son particularmente útiles para el análisis económico requerido por la Directiva Marco del Agua europea, en la determinación del costo del recurso y del costo medioambiental de restricciones de cantidad.

Abstract

In last decades the water problems have been increased in almost the whole planet. The causes of this process are well-known: fresh water is a finite and vulnerable resource, there is a sustained increment of the use on the part of society (due to consumption culture), the polluting pressures have been increased and the climate change effects are being felt with more intensity.

This increasing of water shortage, makes that used traditionally management methods —while there was abundant water— no longer are adapted. The new approaches should negotiate the shortage in a rational and sustainable way, since it is not a sporadic drought event, but it is a structural situation where it is necessary to coexist from now on. The economy studies the use of scarce resources and for that reason it has too much to contribute in order to elaborate and to specify these new approaches. The main idea of this thesis is to incorporate the vision, the methods and the economic approaches in order to manage, to negotiate and to plan the water resources.

In this final dissertation two models or computer programs are presented to carry out economic analysis in water resources systems. Both models are generic programs, capable to be employed in almost any basin or water resources system, and they work coupled to Decision Support System (DSS) AQUATOOL, developed previously in DIHMA at the Universidad Politécnica de Valencia.

The EcoGes program carries out the water assignment in an economical and efficient way, distributing the water with market criteria. The model includes physical hydrology, infrastructures with their physical constraints, and the mobilization costs or user disposition to pay by using water, which allow to distribute the resource between users throughout the time. Internally a separable non-linear function of net benefit in a flow network is optimized.

The MEvalGes program carries out multiple economic evaluations of current assignment, obtaining economic indicators that allow to detect highly inefficient situations or losses and waste in the use of water resources. This is a previous and necessary step to undertake correcting measures. In this case the valuation of water doesn't determine the assignment, but rather this is carried out with actually used criteria.

During the use of these programs it is necessary to give a value to water dedicated to different uses. This valuation constitutes an important area of knowledge, which it is a complex task with important uncertainties but necessary. The state of the art has been performed trying to explore available methodologies to reorganize in a rationally way the human uses of the water under conditions of shortage. Then, demand curves have been obtained after perform an application case. It has been devoted special attention in this work to this task, but evidently, data deficiency it is left to later improvements.

Programs were executed for different, real and complex application cases (Spanish National Hydrological Plan and Júcar River basin). These cases allowed to analyze and to compare different hypothesis and proposals, being recommended performances to undertake. The results are particularly useful for the economic analysis required by European Water Framework Directive, in the determination of water cost and the environmental cost of assignment restrictions.

Resum

A les darreres dècades s'han agreujat els problemes d'aigua en quasi tot el planeta. Les causes d'aquest procés són ben conegudes: mentre que l'aigua dolça és un recurs finit i vulnerable; hi ha un sostingut increment de l'ús per part de la societat (per la cultura del consum), un augment de les pressions contaminants, i els efectes del canvi climàtic es deixen sentir amb major intensitat.

Esta creixent escassetat d'aigua útil, fa que els mètodes i formes de gestió emprats tradicionalment —mentres el aigua era abundant— ja no siguen adequats. Els nous criteris han de gestionar l'escassetat de forma racional i sostenible, ja que no s'està davant d'esdeveniments esporàdics de sequera, sinó davant d'una situació estructural amb què hi ha que conviure d'ara en avant. L'economia estudia l'ocupació dels recursos escassos, i per això té molt que aportar per a elaborar i precisar estos nous criteris. La idea central d'esta tesi és incorporar la visió, els mètodes i criteris econòmics en la tasca de gestionar i planificar l'ús dels recursos hídrics.

En esta tesi doctoral s'han desenvolupat dos models o programes informàtics per a realitzar anàlisis econòmiques en sistemes de recursos hídrics. Ambdós són programes genèrics, aptes per a ser empleats en quasi qualsevol conca o sistema de recursos hídrics, i funcionen coordinadament amb el Sistema Suport de Decisió (SSD) AQUATOOL, desenvolupat prèviament en el DIHMA de la Universitat Politècnica de València.

El programa EcoGes realitza l'assignació de l'aigua crua de forma econòmicament eficient, repartint l'aigua amb criteris de mercat. El programa considera la hidrologia, les infraestructures o condicionants físics i els costos de mobilització o disposició a pagar per l'ús de l'aigua, per a distribuir el recurs entre els usuaris al llarg del temps. Internament s'optimitza una funció no-lineal separable de benefici net en una xarxa de flux.

El programa MEvalGes realitza múltiples avaluacions econòmiques de l'assignació actual, obtenint indicadors econòmics que permeten detectar

situacions altament ineficients o de balafiament en l'ocupació del recurs, com pas previ i necessari per a mamprendre mesures correctores. En este cas la valoració de l'aigua no determina la assignació, sinó que esta es realitza amb els criteris actualment en ús.

Per a l'ús d'estos programes és menester valorar l'aigua destinada a distints usos. Esta valoració constituïx un àrea important de coneixement, i portar-la a la pràctica una tasca complexa i amb incerteses importants, però necessària. Es fa una revisió de les metodologies disponiblesment i posteriorment, en el cas d'aplicació, se obtenen corbes de demanda. L'especial dedicació posada en esta tasca no pot suplir, evidentment, la carència de dades, per la qual cosa este aspecte queda obert a millores ulteriors.

L'aplicació d'estos programes a distints casos reals i complexos (Pla Hidrològic Nacional d'Espanya i conca del riu Xúquer) va permetre analitzar i comparar distintes hipòtesis i propostes, recomanant actuacions a mamprendre. Els resultats són particularment útils per a l'anàlisi econòmica requerit per la Directiva Marco de l'Aigua europea, en la determinació del cost del recurs i del cost mediambiental de restriccions de quantitat.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Problemática	2
1.2. Motivo	5
1.3. Objetivos de la tesis	6
1.4. Organización de la tesis	6
2. Antecedentes	9
2.1. Revisión de modelos de gestión de recursos hídricos	10
2.1.1. Modelos de SRH	11
2.1.2. Objetivos a alcanzar en un SRH	14
2.1.3. Modelos matemáticos antecedentes	15
2.2. Revisión de métodos de optimización	22
2.2.1. Optimización	22
2.2.2. Programación lineal (PL)	23
2.2.3. Programación no lineal (PNL)	29
2.2.4. Códigos de algoritmos	35
2.3. Revisión de conceptos económicos	39
2.3.1. Modelo económico neoclásico	40
2.3.2. Modelo básico de oferta y demanda	42
2.3.3. Evaluación de proyectos	55
2.3.4. Inclusión de la visión ambiental en la economía	58
2.4. Modelos económicos antecedentes	60
2.4.1. Modelos de asignación eficiente	61
2.5. Recapitulación de los antecedentes recopilados	63
3. Revisión de metodologías de valoración del agua	65
3.1. Generalidades	65
3.1.1. Definiciones	65
3.1.2. Características singulares del agua	67
3.1.3. Clasificación de los usos del agua	69
3.1.4. Composición del valor económico total	71
3.1.5. Estimación del valor del agua	72
3.2. Técnicas de valoración	73
3.2.1. Métodos basados en mercados convencionales	73
3.2.2. Métodos basados en mercados implícitos	76
3.2.3. Métodos basados en mercados contruados	77
3.2.4. Métodos no-económicos	77
3.3. Características de las curvas de demanda	78

3.3.1.	Uso urbano	78
3.3.2.	Uso agrícola	81
3.3.3.	Uso hidroeléctrico	86
3.3.4.	Uso industrial	87
3.3.5.	Uso para dilución de contaminantes	88
3.3.6.	Uso recreativo	89
3.3.7.	Uso ambiental	90
3.3.8.	Otros usos	90
3.4.	Sistemas tarifarios	90
3.5.	Comentarios finales	91
4.	Programa EcoGes	93
4.1.	Motivación y utilidad	94
4.2.	Breve descripción de OptiGes	95
4.3.	Descripción de EcoGes	98
4.3.1.	La función objetivo	100
4.3.2.	Las restricciones	103
4.3.3.	Minimizar la función objetivo	104
4.3.4.	La red de flujo para el problema no lineal	105
4.3.5.	El punto inicial de la optimización	106
4.3.6.	El mecanismo iterativo	107
4.3.7.	Partición del periodo a optimizar	108
4.3.8.	El diagrama de flujo de EcoGes	109
4.4.	Capacidades adicionales	110
4.4.1.	Acuíferos en la red interna	110
4.4.2.	Precipitación para disminuir los usos agrícolas	111
4.5.	Uso del programa EcoGes	112
4.6.	Análisis de casos simples con EcoGes	113
4.6.1.	Caso A1	114
4.6.2.	Caso A2	117
4.6.3.	Caso B1	119
4.6.4.	Caso B2	121
4.6.5.	Caso B3	123
4.6.6.	Caso B4	124
4.6.7.	Caso C1	129
4.6.8.	Caso D1	131
4.6.9.	Caso E1	133
4.6.10.	Caso G1	137
4.6.11.	Caso H2	139
4.6.12.	Caso J1	141
4.6.13.	Conclusiones del análisis de los casos simples con EcoGes	143

5. Programa MEvalGes	145
5.1. Breve descripción de SimGes	146
5.2. EvalGes	148
5.2.1. La función a evaluar	148
5.2.2. El procedimiento de evaluación	149
5.3. MEvalGes	151
5.3.1. Definiciones útiles	151
5.3.2. Fundamentos generales	152
5.3.3. Pseudo-valor marginal del recurso	153
5.3.4. Pseudo-costo marginal de las restricciones	155
5.3.5. Otros asuntos de interés	156
5.4. Uso de MEvalGes	158
5.5. Gestal	159
5.5.1. Introducir datos económicos	160
5.5.2. Calcular el valor del indicador	161
5.5.3. Graficar los resultados	161
5.6. Comentarios finales acerca de MEvalGes	162
5.7. Análisis de casos simples con MEvalGes	163
5.7.1. Caso A2eva	165
5.7.2. Caso B0eva	169
5.7.3. Caso B1eva	171
5.7.4. Caso B2eva	173
5.7.5. Caso C1eva	175
5.7.6. Caso D1eva	176
5.7.7. Caso E1eva	178
5.7.8. Caso F1eva	180
5.7.9. Caso G1eva	182
5.7.10. Caso L1eva	185
5.7.11. Caso M1eva	187
5.7.12. Caso M2eva	189
5.7.13. Caso N1eva	190
5.7.14. Caso P1eva	191
6. Caso de estudio I: Plan Hidrológico Nacional (España)	195
6.1. Introducción	195
6.1.1. Descripción y planteamiento del problema original	195
6.1.2. Sistema de recursos hídricos	196
6.2. Optimización de los flujos	198
6.2.1. Problemas con las funciones de costo unitario	198
6.2.2. Resultados	199
6.3. Breve análisis de resultados	200
6.3.1. Costo del agua en los puntos de consumo	201
6.3.2. Beneficios magnificados	202
6.3.3. Costos disminuidos	203
6.4. Nuevos cálculos	204
6.4.1. Modificar algunos parámetros del problema	204

6.4.2. Usar curvas de demandas para los usos urbano y agrícola	209
7. Caso de estudio II: cuenca del Júcar	213
7.1. Descripción de la cuenca	214
7.1.1. Geografía	214
7.1.2. Climatología	214
7.1.3. Cubierta vegetal e infiltración	215
7.1.4. Recursos hídricos	215
7.1.5. Usos actuales	216
7.1.6. Actividades económicas	217
7.1.7. Principales infraestructuras	218
7.2. Ubicación geográfica de los distintos usos	218
7.2.1. Descripción del modelo	220
7.3. Obtención de las funciones económicas	223
7.3.1. Usos agrícolas	223
7.3.2. Usos urbanos	234
7.3.3. Uso industrial	237
7.3.4. Uso hidroeléctrico	238
7.3.5. Uso ambiental	240
7.3.6. Bombeos del acuífero Mancha Oriental	241
7.3.7. Recapitulación de datos económicos	243
7.4. Aplicación de MEvalGes	245
7.4.1. Modelo del sistema de recursos hídricos	245
7.4.2. Resultados del caso inicial	248
7.4.3. Nuevas hipótesis	252
7.5. Aplicación de EcoGes	256
7.5.1. Datos utilizados	256
7.5.2. Datos económicos	258
7.5.3. Resultados	260
7.5.4. Análisis de sensibilidad	266
7.5.5. Nuevas hipótesis	267
7.6. Comparación de ambos modelos y conclusiones	270
8. Conclusiones	273
8.1. Recapitulación del trabajo presentado	273
8.2. Conclusiones	274
8.3. Contribuciones	275
8.4. Valoraciones personales	275
8.5. Líneas futuras de investigación	276
Bibliografía.	278
APÉNDICES	295
A. Ejemplo de la importancia del punto inicial en optimización no lineal	297

B. Funciones de costo del Caso PHN	299
C. Descripción de los archivos de datos de EcoGes	301
C.1. Archivo de datos físicos de OptiGes	301
C.2. Archivos de aportaciones de OptiGes	302
C.3. Archivo de datos económicos de los elementos	302
C.4. Archivo de datos adicionales	303
C.5. Archivo de precipitaciones	304
D. Archivo de datos económicos del caso Júcar para EcoGes	307
E. Descripción de los archivos de datos de MEvalGes	311
E.1. Archivo de datos físicos de SimGes	311
E.2. Archivo de aportaciones	311
E.3. Archivo de propiedades económicas de los elementos	311
E.4. Archivo con los datos de las modificaciones	312
F. Archivo de datos económicos del caso Júcar para MEvalGes	315
G. Eco de datos del caso Júcar en SimGes	317
H. Glosario	333

Índice de figuras

1.1. Escasez y formas de gestión de los recurso hídricos.	5
2.1. Ciclo hidrológico natural (Chow et at., 1988).	10
2.2. Red de flujo aplicada a un SRH	26
2.3. Ejemplo de comparación entre PL y PNL.	30
2.4. Función con dos mínimos locales.	31
2.5. Ejemplo de función convexa	32
2.6. Curva FPP (frontera de posibilidad de producción).	41
2.7. Curva de demanda.	42
2.8. Suma de curvas de demanda de un bien privado.	43
2.9. Variación de la elasticidad sobre una curva de demanda recta.	44
2.10. Curvas de Indiferencia.	44
2.11. Restricción presupuestaria del consumidor.	45
2.12. Efecto del aumento del precio del bien.	46
2.13. Curva de oferta.	46
2.14. Costos medios y costos marginales.	48
2.15. Ley de rendimientos decrecientes.	48
2.16. Costos en una economía de escala.	49
2.17. Equilibrio de mercado.	49
2.18. Excedente consumidor.	50
2.19. Excedente del productor.	50
2.20. Equilibrio de mercado, situación óptima para productores y consumidores.	51
2.21. Efecto de los subsidios.	52
2.22. Respuesta ante un desplazamiento brusco de la oferta.	53
2.23. Ajuste del mercado frente a un desplazamiento de la oferta.	53
2.24. Suma de curvas de demanda de un bien público.	55
2.25. Visión tradicional del ciclo económico.	58
2.26. Visión sostenible del ciclo económico.	58
3.1. Consumo <i>per-cápita</i> vs. precio.	79
3.2. Elasticidad residencial en distintas estaciones.	80
3.3. Curvas de demanda urbana en distintas épocas del año.	80
3.4. Curva de demanda del uso agrícola, obtenida por programación matemática.	83
3.5. Curvas de demanda para uso agrario en el Levante español.	84
3.6. Curvas de demanda para uso agrario por zonas (PHN).	85
3.7. Variación diaria de la potencia eléctrica consumida.	86
3.8. Variación semanal del consumo de energía, porcentajes respecto al miércoles.	86
3.9. Variación mensual del consumo de energía, en porcentajes.	86

3.10. Variación de los costos totales en función de la concentración.	88
4.1. Ventana de OptiWin, SSD Aquatool.	95
4.2. Esquema de un SRH.	95
4.3. Red interna del esquema de la figura anterior, para un intervalo de tiempo.	96
4.4. Funciones de precio unitario.	96
4.5. Gráficos de resultados de OptiWin.	97
4.6. Función económica de un elemento del SRH.	98
4.7. Ejemplos de posibles formas de la fe admitidas en EcoGes.	100
4.8. Función objetivo bidimensional con muchos mínimos locales.	102
4.9. Función económica del elemento i y beneficio-perjuicio para un suministro x_i	104
4.10. Red interna para un caso de ejemplo.	105
4.11. Esquema del mecanismo lineal con 2 arcos.	106
4.12. Puntos correctos para subdividir un horizonte temporal de optimización.	108
4.13. Diagrama de flujo del programa EcoGes.	109
4.14. Acuíferos en la red interna no lineal.	110
4.15. Interfaz de OptiWin, del SSD Aquatool.	112
4.16. Esquema del Caso A1.	114
4.17. Curvas de demanda de los distintos.	114
4.18. Obtención gráfica de la asignación por igualdad del valor marginal.	116
4.19. Resultados del Caso A2.	117
4.20. Valor marginal del agua en el nudo 2.	118
4.21. Esquema del Caso B1.	119
4.22. Resultados del Caso B1.	120
4.23. Resultados del Caso B2.	122
4.24. Perjuicios evitados con distintos tamaños de embalse.	122
4.25. Perjuicios evitados con distintos tamaños de embalse.	122
4.26. Curvas de demanda del Caso B3.	123
4.27. Volumen almacenado y precio, Caso B4, $V_{max} = 200 \text{ hm}^3$	124
4.28. Volumen almacenado y precio, Caso B4, $V_{max} = 700 \text{ hm}^3$	124
4.29. Volumen almacenado y precio, Caso B4, $V_{max} = 1200 \text{ hm}^3$	124
4.30. Volumen almacenado y precio, Caso B4, $V_{max} = 2500 \text{ hm}^3$	125
4.31. Evolución de precio con el volumen, Caso B4, $V_{max} = 1200 \text{ hm}^3$	125
4.32. Evolución de precio con el volumen, Caso B4, $V_{max} = 2500 \text{ hm}^3$	125
4.33. Histogramas de precios para distintas capacidad de embalse, Caso B4.	126
4.34. Histogramas acum. de precios para distinto V_{max} del embalse, Caso B4.	127
4.35. Volumen almacenado, Caso B4, $V_{max} = 700$, con menos iteraciones.	128
4.36. Volumen almacenado, Caso B4, $V_{max} = 700$, con más iteraciones.	128
4.37. Esquema del Caso C1.	129
4.38. Curvas de demandas del Caso C1.	129
4.39. Resultados del Caso C1.	130
4.40. Esquema del Caso D1.	131
4.41. Resultados del Caso D1.	132
4.42. Esquema del Caso E1.	133
4.43. Esquema del Caso G1.	137

4.44. Esquema del Caso H2.	139
4.45. Esquema “virtual” del Caso H2.	140
4.46. Esquema del Caso J1.	141
4.47. Probabilidad de igualar o superar el precio (o valor marginal) en el nudo 2.	141
5.1. Ejemplo de esquema del SRH.	146
5.2. Funciones económicas implícitas en SimGes.	147
5.3. Obtención del beneficio neto para un elemento e en un mes.	149
5.4. Pasos de la evaluación económica realizada por EvalGes.	149
5.5. Idea básica de la metodología de MEvalGes.	152
5.6. Diagrama de flujo de EvalGes, para el cálculo del p.v.m.r. en nudos.	154
5.7. Ventana principal de Gestal, con el esquema de un SRH.	159
5.8. Ventana de la base de datos económicos.	160
5.9. Ventana para introducir el Δ de volumen en el cálculo del indicador.	161
5.10. Resultado del volumen almacenado en un embalse.	162
5.11. Resultado del pseudo-valor marginal del recurso en un nudo.	162
5.12. Esquema del Caso A2eva.	165
5.13. Aportación del Caso A2eva.	165
5.14. Flujo en C-1 del Caso A2eva.	166
5.15. Flujo en C-2 y C-3 del Caso A2eva.	166
5.16. Suministro al Uso U del Caso A2eva.	166
5.17. Suministro al uso A del Caso A2eva.	166
5.18. Curvas de demanda del Caso A2eva-1.	167
5.19. Excedente económico del Caso A2eva-1.	167
5.20. Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 2 del Caso A2eva-1.	167
5.21. Curvas de demanda del Caso A2eva-2.	168
5.22. Excedente económico del Caso A2eva-2.	168
5.23. Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 2 del Caso A2eva-2.	168
5.24. Esquema del Caso B1eva.	169
5.25. Suministro a Uso U, CasoA2eva-2.	169
5.26. Volumen final almacenado en el embalse, Caso B0eva.	169
5.27. Suministro al Uso U, Caso B0eva.	169
5.28. Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 2, Caso CasoA2eva-2.	170
5.29. Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 2, Caso B0eva.	170
5.30. Volumen final almacenado en el embalse, Caso B0eva.	171
5.31. Flujo en C-3, Caso B0eva.	171
5.32. Suministro al Uso U, Caso B0eva.	171
5.33. Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 2, Caso B0eva.	171
5.34. Volumen final almacenado en el embalse, Caso B1eva.	171
5.35. Flujo en C-2 y C-3, Caso B1eva.	171
5.36. Suministro a Uso U, Caso B1eva.	171
5.37. Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 2, Caso B1eva.	171
5.38. Volumen final almacenado en el embalse, Caso B1eva.	173
5.39. Flujo en C-2 y C-3, Caso B1eva.	173
5.40. Suministro a Uso U, Caso B1eva.	173
5.41. Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 2, Caso B1eva.	173

5.42. Volumen final almacenado en el embalse, Caso B2eva.	173
5.43. Flujo en C-3, Caso B2eva.	173
5.44. Suministro al Uso U, Caso B2eva.	173
5.45. Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 2, Caso B2eva.	173
5.46. Perjuicios evitados con distintos tamaños de embalse.	174
5.47. Perjuicios evitados con distintos tamaños de embalse.	174
5.48. Curvas de demandas del Caso C1eva.	175
5.49. Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 2, Caso B1eva.	175
5.50. Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 2, Caso C1eva.	175
5.51. Esquema del Caso D1eva.	176
5.52. Flujo en C-5, Caso D1eva.	176
5.53. Flujo en C-2 y C-3, Caso C1eva.	177
5.54. Suministro a Uso U, Caso C1eva.	177
5.55. Flujo en C-2 y C-3, Caso D1eva.	177
5.56. Suministro a Uso U, Caso D1eva.	177
5.57. Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 2, Caso C1eva.	177
5.58. Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 2, Caso D1eva.	177
5.59. Esquema del Caso E1eva.	178
5.60. Flujo en C-2 y C-3, Caso D1eva.	178
5.61. Suministro a Uso U, Caso D1eva.	178
5.62. Flujo en C-2, Caso E1eva.	178
5.63. Suministro a Uso U, Caso E1eva.	178
5.64. Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 2, Caso D1eva.	179
5.65. Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 2, Caso E1eva.	179
5.66. Esquema del Caso F1eva.	180
5.67. Flujo en C-2, Caso E1eva.	180
5.68. Suministro a Uso U, Caso E1eva.	180
5.69. Flujo en C-2, Caso F1eva.	180
5.70. Suministro a Uso U, Caso F1eva.	180
5.71. Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 2, Caso F1eva.	181
5.72. Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 3, Caso F1eva.	181
5.73. Esquema del Caso G1eva.	182
5.74. Funciones económicas del Caso G1eva.	182
5.75. Bombeos al Uso U2, Caso G1eva.	183
5.76. Volumen del acuífero Unicelular (por superposición), Caso G1eva.	183
5.77. Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 2, Caso G1eva.	183
5.78. Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 3, Caso G1eva.	183
5.79. Valor económico neto de Uso U y Uso U2, Caso G1eva.	184
5.80. Suministro a Uso U, Caso L1eva.	185
5.81. Volumen final almacenado en el embalse, Caso L1eva.	185
5.82. Flujo en C-3, Caso L1eva.	185
5.83. Pseudo-costo de la restricción de V_{min} en el embalse, Caso L1eva.	186
5.84. Ejemplo de aumento de beneficio neto.	186
5.85. Volumen final almacenado en el embalse, Caso M1eva.	187
5.86. Flujo en C-3, Caso M1eva.	187

5.87. Suministro a Uso U, Caso M1eva.	187
5.88. Pseudo-costo de la restricción de V_{min} en C-3, Caso M1eva.	188
5.89. Pseudo-costo de la restricción de V_{min} en C-3, Caso M2eva.	189
5.90. Pseudo-costo marginal en el nudo 2 con fe anual en Uso A, Caso N1eva. . .	190
5.91. Suministro al Uso A, Caso N1eva.	190
5.92. Pseudo-costo marginal en el nudo 2 con fe mensual en Uso A, CasoB2eva. .	190
5.93. Probabilidad de pvmr en el nudo 2, con $V_{ini} = 0$, Caso P1eva.	191
5.94. Probabilidad de pvmr en el nudo 2, con $V_{ini} = 100$, Caso P1eva.	192
5.95. Probabilidad de pvmr en el nudo 2, para distinto V_{ini} , Caso P1eva.	192
6.1. Esquema del PHN.	197
6.2. Costo admitido.	199
6.3. Costo real.	199
6.4. Solución del PHN.	200
6.5. Costos del agua trasvasada en los destinos.	201
6.6. Curvas de demanda agraria (PHN).	201
6.7. Flujo de caja del PHN.	205
6.8. Flujo de caja para el caso a).	206
6.9. Flujo de caja para el caso b).	207
6.10. Flujo de caja para el caso c).	207
6.11. Flujo de caja para el caso d).	208
6.12. Curvas de demanda utilizadas.	210
6.13. Nuevo esquema del PHN.	211
7.1. Ubicación del río Júcar, y territorio de la CHJ.	213
7.2. Cuenca del Júcar dentro del ámbito de la CHJ.	213
7.3. Modelo digital del terreno de la CHJ.	214
7.4. Precipitación media anual en la CHJ.	214
7.5. Área del acuífero Mancha Oriental y río Júcar.	216
7.6. Evolución de la superficie regada en el ámbito de la CHJ.	217
7.7. Esquema del SRH del Júcar.	219
7.8. Detalle del esquema del SRH del Júcar aguas abajo de Tous.	222
7.9. Distribución de cultivos en la zona inferior del río Júcar.	224
7.10. Ejemplo de curva de demanda “escalonada”.	225
7.11. Variación mensual adoptada para los 3 monocultivos considerados.	228
7.12. Curvas de demanda agrarias en el ámbito de la CHJ.	230
7.13. Curvas de demanda de agua para regar cítricos y huerta (anual) variante. .	231
7.14. Curvas de demanda de agua para regar arroz (anual).	231
7.15. Evolución de la superficie regada en la zona de Albacete.	233
7.16. Evolución del nivel piezométrico en Albacete, acuífero Mancha Oriental. .	233
7.17. Curva de demanda para los riegos de Albacete (anual).	234
7.18. Variación mensual del uso urbano en Marina Baja ATS.	235
7.19. Relación costo unitario medio-consumo diario <i>per cápita</i> en abastecimientos. .	235
7.20. Curvas de requerimiento admisible (orientativo) MOPTMA (1995).	236
7.21. Curvas de requerimiento admisible (orientativo) MOPTMA (1995).	236
7.22. Curvas de demanda urbanas (anuales).	237

7.23. Curva de demanda del uso industrial (anual).	238
7.24. Curva de demanda de los usos hidroeléctricos.	239
7.25. Curvas de demanda de los usos ambientales.	241
7.26. Relación profundidad-volumen modelado en el acuífero Mancha Oriental.	242
7.27. Curvas de demanda anuales utilizadas.	243
7.28. Curvas de demanda anuales utilizadas (detalle).	243
7.29. Esquema del SRH del Júcar para simulación.	247
7.30. Volumen almacenado en los embalses de cabecera.	248
7.31. Excedente (beneficio) económico neto total (anual).	248
7.32. Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 2.	249
7.33. Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 14 (<i>Embalse de Tous</i>).	249
7.34. Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 17.	249
7.35. Pseudo-costo marginal del volumen mínimo mensual de las salidas al mar.	250
7.36. Relación <i>PVMR</i> -volumen almacenado.	251
7.37. Volumen mínimo impuesto a las salidas al mar.	252
7.38. Diferencia del excedente económico del caso inicial y del caso con V_{min} en la desembocadura.	253
7.39. Diferencia del excedente económico del caso inicial y del caso con el volumen del uso 13 reducido.	253
7.40. Indicadores de restricción de usos agrícolas.	254
7.41. Relación entre el coeficiente de restricción y el volumen almacenado.	255
7.42. Comparación del pseudo-valor marginal del recurso.	255
7.43. Esquema del sistema Júcar para optimización.	257
7.44. Desagregación mensual de la función económica anual.	258
7.45. Curvas de demanda mensual para el uso Escalona y Carcagente.	258
7.46. Curvas de demanda mensuales de los usos ambientales en optimización.	259
7.47. Suma del volumen almacenado en los embalses de Alarcón y Contreras.	260
7.48. Asignación anual a distintos usos.	260
7.49. Asignación anual al total de cultivos de arroz.	261
7.50. Evolución de la salida del acuífero Acequia Real al río Júcar.	261
7.51. Bombeos del acuífero Mancha Oriental para el uso 13 (<i>Zona Albacete</i>).	262
7.52. Suministro al uso 12 <i>Sustitución Mancha</i> y bombeos desde el acuífero.	262
7.53. Evolución del acuífero Mancha Oriental.	262
7.54. Valor marginal en los nudos, optimización de a 1 año.	263
7.55. Valor marginal en los nudos, optimización de a 2 años (adoptado).	263
7.56. Valor marginal en los nudos, optimización de a 3 años.	263
7.57. Valor marginal en los nudos, optimización de a 5 años.	264
7.58. Almacenamiento superficial y <i>vmr</i> en el nudo 14 (embalse de Tous).	265
7.59. Envoltente del almacenamiento superficial y <i>vmr</i> en el nudo 14.	266
7.60. <i>vmr</i> en la hipótesis de uso ambiental de las salidas al mar.	268
7.61. Función económica para los cítricos, a largo plazo y con expansión infinita.	268
7.62. <i>vmr</i> permitiendo expansión del cultivo de cítricos (largo plazo).	269
A.1. Red de flujo de ejemplo.	297
A.2. Función objetivo y precio.	297

B.1. Costo de construcción. 299

Capítulo 1: Introducción

“La vida sobre la Tierra se enfrenta en este comienzo de siglo XXI con una grave crisis del agua.”

“... Todas las señales parecen indicar que la crisis se está empeorando y que continuará haciéndolo, a no ser que se emprenda una acción correctiva. Se trata de una crisis de gestión de los recursos hídricos, esencialmente causada por la utilización de métodos inadecuados. La verdadera tragedia de esta crisis, sin embargo, es su efecto sobre la vida cotidiana de las poblaciones pobres ...”

En realidad, se trata fundamentalmente de un problema de actitud y de comportamiento, problemas en su mayoría identificables (aunque no todos) y localizables. Actualmente poseemos los conocimientos y la pericia necesarios para abordarlos y hemos elaborado excelentes herramientas conceptuales, tales como la equidad y la noción de sustentabilidad. Sin embargo, la inercia de los líderes y la ausencia de una conciencia clara sobre la magnitud del problema por parte de la población mundial (en muchos casos no suficientemente autónoma para reaccionar), resultan en un vacío de medidas correctivas oportunas y necesarias ...”

Informe de Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo: “Agua para Todos, Agua para la Vida”. ONU/WWAP, 2003.

Se ha iniciado el trabajo con esta cita porque enmarca perfectamente el problema del agua: sus raíces, sus consecuencias en la vida cotidiana, y la inexplicable lentitud en la adopción de medidas y acciones correctivas. Este diagnóstico, lamentablemente, puede extenderse a otras áreas de la gestión de recursos naturales.

Esta crisis en los recursos naturales está provocada en último término, por nuestra sociedad de consumo capitalista, que se va imponiendo en todos los rincones del planeta. Voraz, reclama siempre más y más crecimiento, más consumo, más recursos; y no sólo condena a 3/4 partes de la humanidad a malvivir, sino que a largo plazo hace dudar de la supervivencia de cualquier forma de vida en el planeta Tierra.

Y precisamente porque su origen se encuentra principalmente en actitudes y comportamientos de los seres humanos, para atacar estos problemas exitosamente no bastan ya ingenieros, geólogos y naturalistas; sino que son indispensables los expertos en ciencias sociales: antropólogos, sociólogos, geógrafos, economistas, juristas, comunicadores

sociales, etc. [Bunge, 1990]. La necesidad de equipos multidisciplinares es por lo tanto evidente, lo cual hace más atractivo el trabajo en este área del conocimiento.

1.1. Problemática

Desarrollo sostenible

El concepto de desarrollo sostenible, fue definido en un trabajo de las Naciones Unidas [ONU/WCED, 1987] como *el desarrollo que satisface las necesidades actuales de las personas sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las suyas*. Esta definición plantea la existencia de un límite (impreciso pero real) a los impactos sobre el “espacio vital” y al consumo del “capital natural” de la humanidad, traspasado el cual las generaciones futuras serán seriamente perjudicadas por nuestras acciones.

Huelga decir que nuestra sociedad sigue un desarrollo claramente no sostenible. Aunque hay muchas voces que abogan por ello, el desarrollo sostenible todavía no es un objetivo prioritario al planificar o regular el uso de los recursos naturales a nivel nacional y supranacional; incluso en países ricos que podrían permitirse el crecer menos en términos de PIB, a cambio de no comprometer la supervivencia de las generaciones futuras.

La gestión y conservación del agua —tema tratado en esta tesis— tiene un papel central en el ámbito del desarrollo sostenible, como se le reconociera en la Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente de Dublín [ONU, 1992]. En esta conferencia se establecieron cuatro principios generales acerca de la gestión de los recursos hídricos, dos de los cuales tienen especial relevancia a los efectos de este trabajo:

Principio 1: El agua dulce es un recurso finito y vulnerable, esencial para sostener la vida, el desarrollo y el medio ambiente.

Principio 4: El agua tiene un valor económico en todos sus diversos usos en competencia a los que se destina y debería reconocérsele como un bien económico.

El admitir que estamos ante un recurso finito implica reconocer la asechanza o la existencia potencial de escasez, que lógicamente ocurrirá en unas regiones antes que en otras. Y para enfrentar esta escasez es clave y necesario reconocerle al agua un valor económico en *todos* sus usos.

Escasez y visión económica

En pocas décadas el agua pasó de ser abundante y casi ilimitada, a ser un bien cada vez más escaso; y todo indica que esta tendencia se mantendrá en el futuro. Esta escasez creciente de *agua útil* es producto de varias causas concurrentes:

- Los recursos hídricos tienen una cantidad finita y se renuevan a una tasa constante. Pero se ven menguados por:
 - el cambio climático a escala planetaria hace muy probable la disminución de las precipitaciones en latitudes intermedias, con eventos más torrenciales (menos aprovechables).
 - el aumento de la contaminación, que disminuye el recurso en condiciones de ser aprovechado.
- El aumento constante de las necesidades debido al aumento poblacional y al crecimiento de las actividades productivas como regadío, industria, etc.

Frente esta tendencia, la economía –ciencia que estudia el empleo de los recursos escasos– puede ofrecer una valiosa ayuda para la gestión racional del recurso hídrico.

Justamente el objetivo central de esta tesis ha sido desarrollar y utilizar herramientas y metodologías para realizar análisis económicos del uso del agua a nivel de cuenca. A los modelos matemáticos preexistentes en el grupo de trabajo, se les ha añadido nuevos módulos para realizar cálculos económicos, y otros programas se han desarrollado desde cero con igual finalidad. En estos cálculos económicos se utiliza el valor del agua en los distintos usos alternativos, tal como sugería el *Principio 4* antes citado.

La visión económica sobre un sistema de recursos hídricos aporta una nueva perspectiva, y permite reinterpretar los problemas actuales de recursos hídricos: lo que antes parecían problemas distintos —excesiva contaminación, sequías, secado de acuíferos, etc.— se ven ahora como consecuencias múltiples de un único problema: el agua está subvalorada¹ en la gran mayoría de los usos, o dicho de otro modo, no existen incentivos económicos para fomentar el uso correcto y sostenible del agua disponible (o peor aún, hay incentivos económicos que fomentan el uso ineficiente) [Young, 1996b].

El análisis económico ha de hacerse a escala de cuenca, unidad “natural” de gestión como es unánimemente reconocido [ONU/WWAP, 2003, Dourojeanni et al., 2002, UNCED, 1992], porque:

- es la forma terrestre que capta y concentra la oferta hidrológica.
- es el área donde interactúan el agua, el sistema físico y la biota.
- es el territorio donde interactúan los sistemas físicos y bióticos con el sistema socioeconómico y los usuarios del recurso.

Esta interdependencia dentro de la cuenca, obliga a considerar los problemas y soluciones teniendo en cuenta todo el conjunto del sistema hídrico. El enfoque individual y local de los problemas conduce a soluciones no satisfactorias para el conjunto.

¹La palabra valor en este contexto tiene un alcance amplio que incluye el valor social, el religioso, etc. otorgado por los individuos, las comunidades y los grupos étnicos.

De todas formas es conveniente recordar que si bien el análisis económico es muy importante, no ha de ser el único aspecto a considerar al momento de tomar decisiones. Otras cuestiones, tales como la equidad o justicia social, la sostenibilidad, la salubridad pública, etc. deben ser considerados y valoradas conjuntamente para llegar a una decisión aceptable.

Agotamiento de la gestión tradicional

La gestión actual se hace siguiendo los sistemas legales e institucionales vigentes, con una gran regulación por parte de la Administración. La asignación actual es el resultado de la evolución histórica, que en general, pasó por las siguientes etapas:

- En épocas pretéritas, cuando los usos potenciales del agua eran modestos en comparación con el agua disponible, el gobierno asignó derechos a particulares para usos privativos de forma generosa. Fue una asignación en época de abundancia.
- Gradualmente, con el paso del tiempo, las necesidades aumentaron y los nuevos usuarios se encontraron que el agua más accesible estaba distribuida, con lo que hubieron de conseguir agua de otras fuentes más lejanas, inseguras y costosas.

En la actualidad no es difícil encontrar que mientras unos usuarios tienen derechos a usar agua abundantemente, otros no tienen el agua que desean, o la tienen a un costo muy alto. Estas situaciones de ineficiencia e injusticia en el uso del recurso, se agudizan debido a la interdependencia de los usuarios (por la interconexión presente en el ciclo hidrológico), en especial de los usuarios de aguas abajo respecto a los de aguas arriba. La determinación de estos efectos externos de unos usos sobre otros es normalmente compleja y difícil cuantificar.

Además, los usuarios que disponen agua en cantidades generosas no tienen estímulos para el ahorro: prefieren usar completamente estas cantidades (aunque sean innecesarias), ante el temor que sus derechos sean recortados [Sumpsi Viñas et al., 1998]. La rigidez del sistema de derechos de uso en la gestión tradicional hace difícil resolver situaciones de escasez de forma eficiente.

La Figura 1.1 esquematiza la forma de gestión tradicional, y las razones del agotamiento de éstas políticas. Ante el aumento gradual pero constante de los requerimientos, por la entrada de nuevos usuarios en el sistema, la respuesta de la gestión tradicional fue un aumento periódico de la oferta, casi siempre en base a inversiones físicas para aumentar el almacenamiento y la regulación en la cuenca (lado izquierdo de la figura). El aumento de disponibilidad resolvía el problema para los usos ya instalados, pero la capacidad remanente atraía la incorporación de nuevos usuarios.

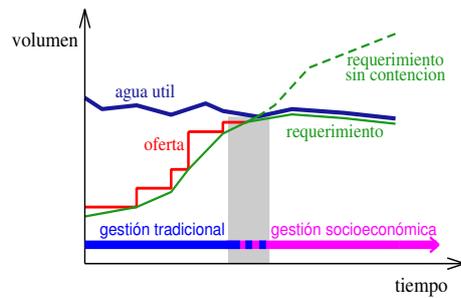


Figura 1.1: Escasez y formas de gestión de los recurso hídricos.

El agotamiento de la capacidad de regulación y una conciencia ambiental más respetuosa en la época actual (zona sombreada) llevó a utilizar nuevas técnicas de gestión, como la reutilización de aguas residuales, el uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas, la desalación, la captación urbana de lluvias [Niemczynowicz, 2000], etc. Pero el gran desafío de la nueva gestión del agua es conseguir contener la tendencia en el crecimiento de los requerimientos (línea de trazos), puesto que como se dijo anteriormente el agua útil es un recurso finito (lado derecho de la Figura 1.1). Para esta contención es necesario el empleo de instrumentos económicos, que consigan redistribuir el recurso con cierta justicia, racionalidad y sin crear conflictos sociales. Son numerosas las voces del ámbito académico se expresan en este sentido [Aguilera Klink, 1998, Arrojo Agudo, 2002].

1.2. Motivo

El presente trabajo surgió a causa de cuestionar la asignación actual del agua. ¿Por qué se asigna de una determinada forma el agua? ¿Se puede mejorar esa asignación? ¿Es razonable abastecer siempre cualquier requerimiento hídrico? Es común la sospecha de que muchas grandes obras hidráulicas terminan siendo muy malos negocios para la sociedad que los ha emprendido. Nuevamente otra cita certera enfoca la cuestión central:

“Los proyectos hidráulicos se emprenden en un intento de proveer agua en cantidad y calidad adecuada, en los momentos y lugares donde esta es lo suficientemente valiosa para justificar tal esfuerzo. [Loucks et al., 1981]

Los modelos de simulación y optimización de Sistemas de Recursos Hídricos (SRH) son utilizados desde hace tiempo en la gestión del agua, y consiguen con mayor o menor éxito, reproducir las interrelaciones entre los distintos elementos que componen dicho sistema, a efectos de estudiar y predecir las condiciones de funcionamiento y el rendimiento de distintas hipótesis y propuestas de actuación en los SRH [Mays, 1996].

Los programas más comunes y difundidos realizan el reparto del recurso entre los usos, en base a las prioridades establecidas por el modelador, lo cual es un método fácil e intuitivo; pero con poca capacidad de adaptación al no considerar las condiciones económicas específicas del caso de aplicación.

La idea central de esta tesis es desarrollar nuevos programas que superen la carencia mencionada, y que sean capaces de realizar el análisis económico de la asignación del agua a nivel de cuenca. Estos nuevos modelos han de considerar las características económicas tanto de la oferta de recursos (costos), como de la demanda (beneficios); para asignar de forma económicamente eficientemente el agua, y/o detectar situaciones ineficientes, existentes con la asignación actual. Para este fin es conveniente aprovechar la experiencia en el uso de modelos existente en el grupo de trabajo, y hacer que los nuevos modelos sean compatibles con los precedentes.

1.3. Objetivos de la tesis

El objetivo inicial de este trabajo fue desarrollar un modelo general o genérico de gestión de recursos hídricos, compatible con los modelos antecedentes, para realizar la asignación económicamente óptima del agua a nivel de cuenca, y aplicarlo a casos reales de interés. La aplicación a casos reales hizo necesario determinar las curvas de demanda de los usos y otros parámetros económicos a utilizar.

Durante el desarrollo del objetivo anterior entró en vigor de la Directiva Marco del Agua europea (DMA). Esta norma pone especial énfasis en la forma más económica de lograr el buen estado de las aguas; y aboga por el uso de instrumentos económicos como la recuperación de los costes y el principio de quien contamina paga. Esto llevó a agregar otro objetivo al trabajo: el desarrollo de un segundo modelo, capaz de aplicar los mismos conceptos económicos del modelo de optimización, pero basado en un modelo de simulación. Este segundo modelo ha de permitir obtener indicadores económicos considerando la gestión *actual* del agua, y resulta por lo tanto más aplicable en la práctica que el modelo de optimización.

Otro objetivo más bien práctico era instrumentar un entorno amigable de ventanas para que terceras personas pudieran utilizar fácilmente los modelos. Y ambos modelos debían ser compatibles con el Sistema Soporte de Decisión (SSD) AQUATOOL, desarrollado previamente por el Grupo de Recursos Hídricos del DIHMA de la UPV.

1.4. Organización de la tesis

Los capítulos de esta tesis se organizan de la siguiente forma:

En el Capítulo 2 se presentan los antecedentes necesarios para el desarrollo de este trabajo: en la sección 2.1 se revisa el uso de modelos matemáticos en la planificación y gestión de recursos hídricos; en la sección 2.2 se revisan las técnicas de optimización incluidas típicamente en los modelos anteriores, con énfasis en problemas no lineales; y por último en la sección 2.3 se presentan conceptos económicos que serán de gran utilidad en el resto de los capítulos.

El Capítulo 3 versa sobre la valoración del agua: clasificación de los valores, las particularidades y problemáticas que presenta esta tarea, el estado del arte en los métodos de valoración, y antecedentes de curvas de demanda.

En el Capítulo 4 se describe el modelo de optimización económica EcoGes, que asigna el recurso hídricos con criterios de eficiencia económica, minimizando una función no lineal en una red de flujo. También se exponen varios ejemplos simples de aplicación, que permiten entender conceptualmente la asignación del agua bajo los supuestos de un mercado perfecto.

En el Capítulo 5 se describe el modelo de post-simulación múltiple MEvalGes, que calcula distintos indicadores económicos. El reparto se realiza con los criterios actuales de gestión, mediante un modelo de simulación. La comparación de los resultados de este modelo con los de EcoGes permite extraer útiles conclusiones acerca de la racionalidad económica de la gestión actual. También se muestran ejemplos simples y didácticos de aplicación para mostrar los resultados obtenidos, y ayudar a la interpretación de casos reales.

En el Capítulo 6 se presenta la aplicación de EcoGes al caso del PHN de España. Primeramente se reproduce el resultado de dicho estudio, y luego se realizan nuevas hipótesis que permiten concluir que dicha obra no es económicamente conveniente.

En el Capítulo 7 se presenta la aplicación de ambos modelos al caso del río Júcar (España). Se obtienen las funciones económicas a utilizar, siguiendo en la medida que los datos existentes lo permiten, los criterios del Capítulo 3. Se obtiene el valor marginal del recurso en distintos puntos de la cuenca, y el valor marginal de la restricción de caudal mínimo en la desembocadura. Ambos valores son necesarios para la aplicación de la DMA. La cuenca del Júcar es cuenca piloto en de España en la aplicación de esta norma, por lo que se trata de un estudio pionero en su ámbito.

Por último en el Capítulo 8 se exponen las conclusiones de este trabajo y su posible continuación en distintas líneas de investigación.

Aspectos prácticos:

- La versión digital de esta tesis es útil para buscar palabras en el texto, seguir los hipervínculos existentes y ver las figuras en colores. Este archivo puede descargarse de internet en la siguiente dirección:
<http://ttd.upv.es/~gcollazo/TesisGC.pdf>
- Para ponerse en contacto con el autor:
 - e-mail: gcollazo@hma.upv.es
 - web: <http://ttd.upv.es/~gcollazo/>

Capítulo 2: Antecedentes

En este capítulo se revisan tres grandes temas necesarios para el desarrollo y la comprensión de la presente tesis:

- En primer término, en la sección 2.1 se define un sistema de recursos hídricos, que es el ámbito donde se aplican los modelos desarrollados. Se establece la necesidad del uso de modelos matemático, las condiciones para su aplicación, las funciones que éstos pueden cumplir y los distintos tipos de modelos. Posteriormente se reseña la tendencia evolutiva de los modelos, presentando algunos de los modelos más conocidos, con mención especial de los modelos basados en redes de flujo. Allí se verá que una gran parte de esos modelos contienen un algoritmo que optimiza una función previamente establecida.
- Por lo tanto, la sección 2.2 está destinada a revisar los problemas de optimización, tanto lineales como no lineales: las diferentes formulaciones, sus propiedades y características, las condiciones de existencia del óptimo, las estrategias de optimización y los tipos de algoritmos existentes. Se hace hincapié en los problemas separables, en la minimización del costo en redes de flujo y en los problemas no lineales porque son los que se utilizan en el modelo de optimización desarrollado en esta tesis. También se presenta una revisión de paquetes y códigos informáticos disponibles.
- Por último en la sección 2.3 se presentan algunos conceptos económicos básicos, encuadrados dentro del modelo económico neoclásico. El aporte fundamental de la visión económica es que todas las actividades de producción y consumo tienen *capacidad de adaptación o elasticidad* para reaccionar y adecuarse a situaciones de escasez o abundancia. El núcleo de esta sección es pues, el modelo de oferta y demanda, que se usa posteriormente en el desarrollo de los modelos. El mercado es, dicho sucintamente, un mecanismo de asignación. Por lo antes expuesto resulta importante conocer los supuestos filosóficos y teóricos en que se fundamenta el mercado para interpretar adecuadamente los resultados de los modelos de gestión del agua y valorar sus limitaciones adecuadamente. Se verán entre otros aspectos el costo de oportunidad, el principio de equimarginalidad, el efecto distorsivo de los subsidios y los fallos del mercado. También se presenta la inclusión de la visión ambiental en el modelo económico.

2.1. Revisión de modelos de gestión de recursos hídricos

El agua es uno de los elementos más comunes de la Tierra; sin embargo, solo una pequeña proporción de este agua es agua dulce, aprovechable por los seres vivos. Si descontamos el hielo polar, el agua dulce continental es de menos del 1,0% del total del agua de la Tierra.

El agua se mueve en la Tierra siguiendo el ciclo hidrológico (Figura 2.1). Este ciclo es simple conceptualmente, pero resulta muy complejo cuantificar detalladamente cada uno de los fenómenos que en él se producen.

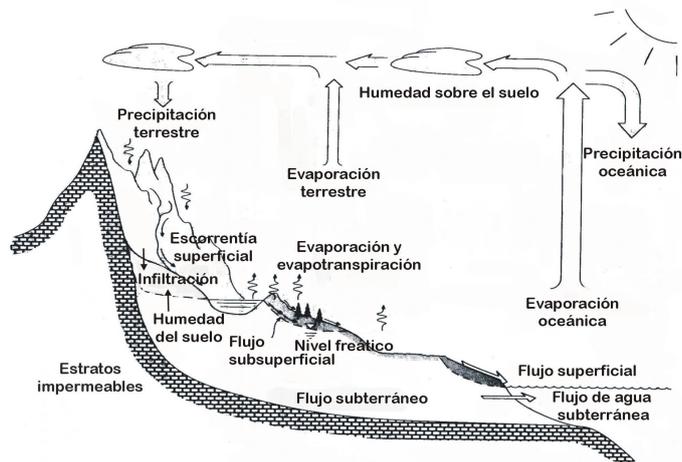


Figura 2.1: Ciclo hidrológico natural (Chow et al., 1988).

De forma general, puede definirse un *sistema* como un conjunto de elementos que interactúan de forma regular. El sistema ha de tener definidos sus límites (o las reglas que permiten especificar y distinguir lo que está en el sistema del ambiente en el cual existe). También deben definirse las entradas y salidas a través de dicho límite [Hall y Dracup, 1970].

Por tanto, un *Sistema de Recursos Hídricos* (SRH) es la parte continental del ciclo hidrológico, que transporta el agua desde el lugar de precipitación hasta el mar o la atmósfera. Un SRH puede comprender la totalidad de una cuenca, o una parte de la misma que tenga cierta independencia del resto, si esto simplifica el análisis. Un SRH, entonces, estará constituido por los cauces, canales, conducciones, embalses, acuíferos, áreas de riego, zonas protegidas ambientalmente, abastecimiento a ciudades, centrales hidroeléctricas, zonas de recreación y deporte, etc. pertenecientes a una cuenca determinada o a una parte de la misma.

Cuando los SRH son grandes o complejos, es difícil comprender su funcionamiento y predecir las consecuencias de una modificación bajo estudio, porque se acentúa la **interdependencia** entre los distintos componentes. Para cuantificar la respuesta del

sistema la experiencia y la intuición no son suficientes, y entonces se recurre a los modelos, como herramientas que ayudan a responder preguntas del tipo ¿qué pasaría si? en un SRH.

2.1.1. Modelos de SRH

Un modelo de SRH es una representación conceptual y simplificada de un SRH real, que preserva sólo las características esenciales del mismo, y desecha otras que no son tan importantes. De esta definición se desprenden dos cosas fundamentales: que todo modelo tiene simplificaciones respecto de la realidad a representar (o sea que hay aspectos de la realidad que no va a poder reproducir satisfactoriamente) [Buras, 2001]; y que un modelo será adecuado siempre que pueda quedarse con la parte medular o fundamental del aspecto a estudiar del sistema. La elección del modelo ha de hacerse teniendo presentes los objetivos de la modelación, y elegir siempre un modelo lo más sencillo posible.

Los modelos pueden ser de distintos tipos, pero a los efectos de este trabajo interesan únicamente los **modelos matemáticos**, en los que las relaciones entre las distintas partes del sistema se representan mediante ecuaciones. Estos modelos son los más difundidos gracias a los prodigiosos avances informáticos de las últimas décadas.

El uso de modelos matemáticos [Loucks et al., 1981] en SRH es de utilidad cuando:

- Los objetivos del sistema están razonablemente bien definidos, y hay individuos u organizaciones con capacidad de implementar las decisiones.
- Hay muchas decisiones alternativas que satisfacen los objetivos planteados y la solución no es obvia.
- Las soluciones alternativas y los objetivos pueden ser representados matemáticamente.
- Los parámetros del modelo pueden estimarse con razonable precisión a partir de datos y estudios.

Los modelos matemáticos son herramientas que complementan y agregan precisión al criterio y la experiencia del planificador, ayudando a responder preguntas (adecuadamente formuladas) acerca del rendimiento o respuesta del sistema bajo análisis. Hay que tener cuidado en el uso apresurado e irreflexivo de los modelos matemáticos, para no pensar que el análisis de sistemas es solamente cálculo [Andreu, 1992a]. Sobre todo hay que evitar que el uso de un programa cree un “aura” de credibilidad de los resultados, perdiendo de vista que estos resultados son el producto final de un programa realizado para funcionar bien en determinadas situaciones, respondiendo a ciertas hipótesis y asumiendo ciertas premisas; y que la bondad de los resultados depende de la bondad de los datos que lo alimentan.

Según [Major y Lenton, 1979], un modelo puede cumplir las siguientes funciones:

- Amplificación: adecuadamente usados, los modelos pueden amplificar el conocimiento de la respuesta de un sistema complejo. Los modelos no producen nueva

información, pero al permitir ordenar y relacionar la información disponible hacen posible un mayor entendimiento del sistema.

- **Organización:** en problemas grandes, los modelos permiten representar y mostrar de forma simple muchas de sus características y de las propuestas de actuación. Los modelos ayudan a depurar y a organizar sistemática y homogéneamente la información disponible.
- **Evaluación:** los modelos de SRH se construyen para incorporar medidas objetivas de rendimiento en los sistemas bajo estudio, y poder hacer comparaciones coherentes entre distintas alternativas.

Todos los modelos matemáticos tienen los siguientes 3 componentes:

- a)- **parámetros:** son valores numéricos que se consideran conocidos (o con una dispersión pequeña) y se asumen como fijos en cada ejecución del modelo, como por ejemplo el coeficiente de evaporación de un embalse. Para estudiar como influye la variación de estos parámetros en los resultados del modelo se realiza el estudio de sensibilidad mediante múltiples ejecuciones.
- b)- **variables:** son los valores numéricos que interesa conocer, y que permiten evaluar la respuesta del sistema, como por ejemplo el caudal en un tramo de río, la asignación de agua a un uso determinado, o el tamaño de un embalse.
- c)- **restricciones:** son las relaciones que vinculan las variables entre sí y con los parámetros del modelo, y que describen el funcionamiento del sistema, como por ejemplo la ecuación de continuidad en la unión de dos afluentes de un río.

De las muchas clasificaciones posibles de los modelos, es especialmente útil la realizada de acuerdo al rol que juegan las variables en el modelo:

Modelos de simulación (o de causa-efecto): las variables describen el estado del sistema como respuesta a unas determinadas entradas al mismo. Las reglas de operación (o funciones de transformación) están completamente establecidas *a priori*. Las conclusiones útiles se obtienen al comparar resultados, mediante ensayos de prueba y error (de las entradas o los parámetros). El peso de la modelación está en la correcta representación de los procesos.

Modelos de optimización (o prescriptivos): las variables tienen cierta libertad dentro de un rango de valores, y la incógnita es determinar el valor de las variables que optimice una función objetivo prefijada. Estos modelos recurren a técnicas numéricas de programación matemática. El peso de la modelación recae en la función objetivo y en las restricciones de las variables.

Así, la optimización se diferencia de la simulación en que el proceso de prueba y error lo realiza el algoritmo matemático de optimización (internamente), usando como indicador de la bondad de la solución el valor de la función objetivo. Normalmente los modelos de simulación, al no tener que encontrar ninguna combinación óptima de variables, permiten una representación más detallada de las relaciones y procesos del sistema.

Estos dos tipos de modelos se suelen usar en forma complementaria, de tal manera que cada uno cubre los aspectos débiles del otro; como se hace en esta tesis en el caso de aplicación de la cuenca del Júcar, en el capítulo 7

Los modelos también se pueden clasificar de otras formas, según alguna de sus características:

- De acuerdo a los casos que pueden resolver:
 - a medida: para resolver un único caso particular (consigue una mayor adaptación a las particularidades del mismo).
 - genéricos: para resolver cualquier caso que se configure, cumpliendo ciertas condiciones.
- De acuerdo a que permitan discriminación o no entre las partes del sistema:
 - agregados: si las variables y parámetros son homogéneos en todo el sistema.
 - distribuidos: si pueden considerar la variabilidad espacial en el sistema.
- De acuerdo a la forma de la función objetivo:
 - lineal: si la función objetivo y las restricciones son lineales.
 - no lineal: si las restricciones y/o la función objetivo son no-lineales.
- De acuerdo a los valores posibles de las variables:
 - continuos: si pueden tomar cualquier valor dentro del rango permitido.
 - discretos: si pueden tomar valores enteros solamente (programación entera).
- De acuerdo a la técnica de optimización utilizada:
 - programación dinámica.
 - programación lineal.
 - programación entera.
 - de redes de flujo.
 - multiplicadores de Lagrange.
 - programación cuadrática.
 - programación no lineal.
- De acuerdo al tratamiento de la incertidumbre:
 - deterministas: si a los parámetros se les asigna un valor fijo.
 - estocásticos o probabilísticos: si los parámetros son considerados como variables aleatorias.
- De acuerdo a la representación del tiempo:
 - de estado estacionario o estático: si no se considera explícitamente el tiempo como una variable.
 - dinámico: sí se considera explícitamente la variable tiempo.

2.1.2. Objetivos a alcanzar en un SRH

¿A quién pertenece el agua? ¿Quién y cómo tienen derecho a usarla? Estas preguntas básicas señalan que la definición de los grandes objetivos de la planificación hídrica es previa a la modelación de un SRH. Como la mayoría de los países reconocen la propiedad pública del agua (al menos de la superficial); dichos objetivos primarios a conseguir han de ser definidos por la sociedad mediante sus representantes.

Sin embargo hay que tener en cuenta que la sociedad no es monolítica, sino que se compone de personas con visiones distintas, lo cual lo expone de forma clarísima Loucks et al. (1981), *“La planificación de recursos hídricos debe tener en cuenta a múltiples usuarios, múltiples propósitos y múltiples objetivos. Diferentes personas tienen diferentes metas, perspectivas y valores. Los problemas de equidad, riesgo, distribución de la riqueza nacional, calidad ambiental, y bienestar social son tan importantes como la eficiencia económica. Es claramente imposible desarrollar un único objetivo que satisfaga todos los intereses, a todas las personas con intereses contrapuestos, y a todos los puntos de vista sociales y políticos.”*

A pesar de la imposibilidad de satisfacer a todos, la sociedad (mediante sus representantes) ha de establecer unos pocos objetivos que contemplen los intereses de las distintas partes involucradas en la gestión del agua. También es pertinente tener en cuenta que los objetivos (de las personas, y por tanto del conjunto social) cambian con el tiempo; situaciones que fueron aceptables en el pasado puede que sean hoy inaceptables.

Antiguamente (o tradicionalmente) se buscaba satisfacer un único objetivo: minimizar los fallos en el suministro, atender las demandas a mínimo costo, o maximizar el beneficio económico. Estos indicadores son relativamente objetivos y fácilmente comparable.

En los últimas décadas, los deseos de la sociedad por gestionar el agua de forma más integral y humana ha llevado a incorporar a objetivos no económicos de la gestión mencionados por Loucks, otros como la sostenibilidad [Ito et al., 2001, Buras, 2000], la preservación de especies, el principio de precaución en aspectos de contaminación, la integración social, etc.

Los problemas de múltiples objetivos [Jaramillo Álvarez, 1998] se caracterizan porque la solución no es óptima si se consideran individualmente cada uno de ellos, sino que existe un intercambio o solución de compromiso entre los distintos objetivos involucrados. Entre estos pueden citarse los siguientes trabajos:

- [Martos et al., 1999] realizan un modelo multiobjetivo para toma de decisiones relacionadas con la asignación de agua entre usos agrícolas en Andalucía, en el que incluyen la evaluación del beneficio económico.
- [Eschenbach et al., 2001] presenta un SSD basado en programación por metas para la gestión multiobjetivo (incluido el objetivo de beneficio económico) de sistemas de embalses, aplicándolo a la cuenca del Tennessee (TVA, EEUU).

- [Westphal et al., 2003] presentan un SSD con posibilidad de optimizar cuatro objetivos, ya sea con modelos lineales o no lineales. Empleado por el Massachusetts Water Resources Authority.

El modelo de asignación económicamente eficiente que se propone en esta tesis se puede utilizar de dos formas en la gestión sostenible y conservación del recurso hídrico:

- a)- si se desarrollan modelos multiobjetivo para la toma de decisiones, el modelo de maximización de beneficios colabora definiendo el indicador económico para las distintas alternativas, que junto con los indicadores ambientales y sociales permitirán la selección de la alternativa más conveniente.
- b)- la incorporación indirecta de los objetivos sociales y ambientales dentro del modelo económico, valorando convenientemente los usos de agua que contribuyen a la consecución de estos otros objetivos o introduciendo restricciones para salvaguardar ciertos valores mínimos de éstos, establecidos a priori.

El enfoque a) es el más correcto desde el punto de vista teórico, pero también el más complejo y costoso de aplicar.

El enfoque b) a pesar de sus limitaciones, convenientemente implementado puede seguir produciendo mejoras en la gestión del agua. Se intuye que los objetivos de calidad ambiental y de sostenibilidad del recurso mejorarán automáticamente si se incorporaran las externalidades que provocan los distintos usos sobre el resto de los usuarios de la cuenca [Young, 1996b]. Otros objetivos que no se pueden incorporar, limitan la aplicación de este enfoque.

2.1.3. Modelos matemáticos antecedentes

Una vez descrita la utilidad, limitaciones y precauciones en el uso de los modelos matemáticos en el campo de los recursos hídricos, se describe el estado actual de la modelación matemática de SRH.

Los modelos actuales son el resultado de una evolución que comienza en la década de 1950 y que progresivamente amplían la cantidad de fenómenos representados y la complejidad de los cálculos, al tiempo que simplifican la interacción con el usuario.

Inicialmente se desarrollaron modelos de una cierta porción del ciclo hidrológico: modelos lluvia-escorrentía, modelos de tránsito de crecidas, modelos de flujo subterráneo, etc. Posteriormente surgieron modelos que permitían simular la totalidad del sistema superficial, con múltiples ríos y embalses, incorporando la forma de operar estas infraestructuras para conseguir el abastecimiento a los distintos usos. Un paso posterior son los modelos que incorporan la simulación simultánea de los distintos procesos hidrológicos, en particular los procesos superficiales y subterráneos. Los avances en la hidrología estocástica y la simulación sintética permitió incorporar el concepto de riesgo en la gestión. De unos pocos años a esta parte están realizando interesantes aportes a la modelación: modelos que incorporan la modelación de la calidad

del agua [Dai y Labadie, 2001, de Azevedo et al., 2000, Percia et al., 1997], modelos eco-hidrológicos y modelos que incluyen la economía del agua.

El auge de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) [McKinney y Cai, 2002] y el empleo de los sensores remotos ha permitido manejar y relacionar gran cantidad de información proveniente de áreas científicas afines e incorporar esta información a los modelos hidrológicos. Los modelos tradicionales se vuelven entonces una pieza en programas más complejos, dando lugar a los llamados Sistemas Soporte de Decisión (SSD) [Pallottino, 1999]. Los SSD son programas informáticos que combinan información, modelos, y conocimientos del medio de una forma amigable y simple, para ayudar al usuario a elegir una opción entre muchas posibles.

Esta evolución confirma la gran interrelación del agua con casi todo los procesos naturales y antrópicos que ocurren en la superficie terrestre (en especial el uso del suelo). La mejora de los ordenadores y los avances informáticos permiten usar modelos más complejos y detallados a fin de conseguir una representación más realista del flujo del agua en la Tierra [Rosegrant et al., 2000, Cai et al., 2003].

A continuación se describen distintos tipos de modelos de SRH, comenzando por modelos específicos para continuar con modelos generales, modelos basados en redes de flujo y finalmente modelos que incorporan consideraciones económicas, tal como los modelos presentados en esta tesis.

Modelos específicos

Los modelos específicos fueron los primeros en surgir, en la década del 70. Por un lado tienen la ventaja de poder representar adecuadamente las peculiaridades propias del sistema a modelar; pero esto mismo hace que el esfuerzo dedicado a su desarrollo y puesta a punto no pueda luego aprovecharse con facilidad. Por esto con el paso del tiempo estos modelos se han transformado en modelos generales o han quedado caducos. Algunos de los pertenecientes a esta categoría son:

- CRSS (Colorado River Simulation System) [Schuster, 1987], de paso temporal mensual simula el comportamiento de la cuenca del río Colorado (USA), con fines de abastecimiento, generación hidroeléctrica, y prevención de avenidas.
- PRISM (Potomac River Interactive Simulation Model) [Palmer et al., 1980], simula el suministro para distintos usos, con el objeto de realizar planes para enfrentar sequías.
- TVA (Tennessee Valley Authority) [Shelton, 1979] de paso temporal semanal o diario simula la gestión multipropósito (navegación, generación de energía y control de crecidas) de los embalses de dicha cuenca.

Modelos generales

Estos modelos generales o genéricos permiten representar distintos SRH diseñados por los usuarios, y están orientados a conseguir la mejor satisfacción de los usos. Se pueden clasificar a su vez en dos subcategorías: los modelos clásicos y los basados en redes de flujo. Los basados en redes de flujo presentan como ventaja al menor tiempo de cálculo, que se manifiesta sobre todo al modelar sistemas grandes y/o complejos [Yeh, 1985]; pero tienen la desventaja que la formulación del problema ha de ceñirse a la estructura de una red de flujo, y esto impone algunas limitaciones en las relaciones que pueden representarse.

Modelos clásicos

Los modelos más conocidos de este grupo [Yeh, 1985, Wurbs, 1993, Ochoa Rivera, 2002] son los siguientes:

- HEC-ResSim [HEC, 2003] es el heredero de los conocidos HEC-3 y HEC-5. Este es probablemente el modelo de simulación más difundido, en el que el usuario define la conectividad y las propiedades de los elementos, y el modelo simula el tránsito del agua por la cuenca manteniendo el balance hídrico y respetando las condiciones de operación de los embalses. Los embalses admiten múltiples finalidades: abastecimiento, generación de energía, control de avenidas, etc.
<http://www.hec.usace.army.mil>
- HYSSR (Hydro System Seasonal Regulation), modelo de escala mensual para simular la expansión y operación de sistemas de embalses multipropósito (energía y control de avenidas). <http://www.nwd-wc.usace.army.mil>
- IRAS (Interactive River-Aquifer Simulation) [Loucks et al., 1993] modelo para simular el tránsito de agua, cuenta con un modelo lluvia-escorrentía, interacciones río acuífero y características de tránsito de ondas en cauces. Utilizado para evaluar las consecuencias ecológicas, económica e hidrológicas de cambios en el uso del suelo o la gestión del agua. <http://www.cfe.cornell.edu/research/urbanwater>
- IRIS (Interactive River System Simulation Program) modelo emparentado con el modelo IRAS, pero enfocado a la simulación de sistemas de recursos hídricos con propósitos de abastecimiento y producción hidroeléctrica; inicialmente concebido como modelo, ha empezado a migrar hacia un sistema soporte a la decisión.
- MIKE-BASIN: este conjunto de modelos en entorno ArcView realiza una descripción al nivel de la cuenca de la disponibilidad de recurso hídrico, los requerimientos sectoriales, la operación multipropósito de embalses, los sistemas de transferencia o extracción de agua y las restricciones medioambientales. Se representa la red de flujo mediante ramas y nodos. <http://www.dhissoftware.com/mikebasin/>
- MITSIM [Strzepek et al., 1989] modelo que permite evaluar el rendimiento económico e hidrológico de una cuenca, considerando como posibles usos del agua, la producción hidroeléctrica, el riego agrícola, y el abastecimiento urbano e industrial, etc.

- RIBASIM (RIVER BASIN SIMULATION) o RIBSIM [Delft Hydraulics, 1991] es parte del SSD Delft (en entorno Windows) que bajo un entorno SIG permite operar diversos módulos (calidad del agua, estratificación de embalses, simulación de la evolución temporal de cuencas complejas, etc). Permite generar y evaluar distintas alternativas hidrológicas o de medidas operativas o institucionales de la gestión del agua. Está emparentado con MITSIM. <http://www.wldelft.nl/cons/area/rbm/index.html>
- RiverWare [Zagona et al., 1998] es un modelo desarrollado por TVA, el USBR y el CADSWES (Universidad de Colorado). Está diseñado especialmente para optimizar varios objetivos que están orden de preferencia. El programa permite usar distintos algoritmos: simulación pura, simulación basada en reglas, u optimización (algoritmo lineal CPLEX); y también permite elegir alguno de los distintos métodos de linealización para las condiciones no-lineales del problema. El paso temporal es adaptable a los fines de la modelación (el TVA usa un paso temporal seis horas mientras que el USBR usa un paso temporal mensual). <http://cadswes.colorado.edu/riverware/>
- SSARR (Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation), modelo que se concibe inicialmente para la predicción de avenidas y luego se amplía a estudios de operación y diseño de embalses. <http://www.nwd-wc.usace.army.mil/report/ssarr.htm>
- SWATMOD [Sophocleous et al., 1999], que se ha construido a partir de subrutinas de los modelos MODFLOW y SWAT debidamente modificadas y vinculadas con interfaces gráficas, para simular procesos de aguas subterráneas, superficiales e interacciones río-acuífero a escala de cuenca. El modelo permite evaluar escenarios en los que se desee determinar el efecto de los usos del agua y de la tierra sobre el sistema río-acuífero. Los autores hacen especial énfasis en que el modelo se ha concebido como una herramienta hidrológica racional para el análisis, de forma sencilla, de cuencas en condiciones de escasez de agua.
- WATERWARE [Jamieson y Fedra, 1996, Fedra y Jamieson, 1996] es un SSD sofisticado, desarrollado por varias universidades y empresas comerciales, y que tiene múltiples módulos de análisis hidrológico, estadístico, climático, de calidad del agua, de hidrogeología, de evidentemente de gestión de recursos hídricos. Desarrollado en un entorno SIG de fácil manejo, se ha empleado en la cuenca del río Lerma-Chapala (México) y en Palestina. <http://www.ess.co.at/WATERWARE/>
- WRAP (Water Rights Analysis Program) [Wurbs, 2003] es un modelo que simula la gestión de las aguas superficiales y la operación de embalses, asignando el recurso de forma secuencial entre los usuarios, siguiendo las prioridades definidas por el modelador. <http://www.tnrcc.state.tx.us/permitting/waterperm/wrpa/wam.html>
- WUAM (Water Use Analysis Model) [Reynolds et al., 1992], [Kassem et al., 1994] también es un modelo de simulación convencional, permite analizar la operación de sistemas de embalses mediante algoritmos de balance hídrico, considerando una escala de prioridades para las demandas, las cuales pueden ser de cuatro tipos: agrícola, hidroeléctrica, industrial, y de abastecimiento. El modelo incorpora las reglas de operación definidas por el modelador, y en función de ellas determina los repartos y las restricciones en el suministro.

Modelos basados en redes de flujo

Dentro de esta subcategoría hay una docena de modelos que —detalle más o detalle menos— pueden considerarse esencialmente iguales. En ellos el usuario establece unas prioridades relativas de los elementos del sistema, y el algoritmo de optimización se encarga de asignar el agua cumpliendo con dichas prioridades. La gran similitud entre los distintos modelos hace suponer que los primeros modelos fueron luego copiados (o incorporada) por investigadores de otras latitudes al crear sus propios modelos. Cada uno de los modelos tiene un uso predominantemente local, usándose cerca de la Universidad o Instituto que lo desarrolló.

La mayoría de los modelos basados en redes de flujo optimizan una función objetivo lineal, y el algoritmo más empleado para ello es el *out-of-kilter* (en castellano: algoritmo de las desviaciones). Las desventajas de emplear redes de flujo lineales en la modelación de SRH, citando a [Simonovic, 2000], son las siguientes:

- no permiten considerar pérdidas de agua en un canal, sino que hay que introducir un proceso iterativo para considerar esto, lo que puede introducir errores en el resultado.
- se asume una disponibilidad instantánea de agua para cualquier elemento de la red (no interviene el tiempo que pasa desde que se produce una suelta de agua hasta que el usuario dispone de ella).
- las no linealidades asociadas a las restricciones se manejan mediante un procedimiento iterativo. En cada iteración se modifican ciertas restricciones, y se envía el nuevo problema al algoritmo lineal. En sentido estricto, no está garantizado que el proceso converja al óptimo del problema no lineal que debería ser resuelto. Este efecto es particularmente notable en los retornos, como se verá en la sección 4.6.9.

Algunos de los modelos de esta categoría son:

- ARSP (Acres Reservoir Simulation Program) [Sigvaldason, 1976, ACRES, 1998] es un modelo general para simular el comportamiento de múltiples embalses multi-propósito basado en redes de flujo. Permite representar los elementos comunes, y además el almacenamiento y las pérdidas de energía en cauces. Tiene rutinas simples para representar el tránsito hidrológico del agua en los cauces. El reparto de agua en cada período se realiza mediante la minimización de una función objetivo lineal, con el algoritmo *out-of-kilter*. Las relaciones no lineales las convierte en lineales por tramos. El modelo puede usar un paso de tiempo mensual, semanal o diario. No dispone de interfaz amigable. <http://www.bossintl.com>
- CRAM (Catchment Resource Assessment Model) [Brendecke et al., 1989] modela los efectos económicos, ambientales y sociales de distintos usos de suelo y del agua, mediante una interfaz gráfica. Este modelo sirve para generar posibles escenarios ante cambios en los usos del suelo, más que como un modelo hidrológico propiamente dicho. El modelo hidrológico trabaja a escala mensual. Para problemas complejos incorpora subrutinas de optimización. <http://easd.org.za/Publicat/pcgis95.htm>

- DWRSIM [Chung et al., 1998] fue concebido originalmente como un modelo de simulación convencional al que luego se le agregó un algoritmo de programación de redes de flujo, con el fin de simular la operación de distintos escenarios; el modelo, al igual que algunos de los anteriores, satisface las demandas de acuerdo con un sistema de prioridades previamente especificadas por el modelador.
- KCOM [Andrews et al., 1992] es un modelo basado en una red de flujo para simular la asignación de agua superficial en el sistema de Kern County, California. El modelo considera extracciones y recargas para considerar las interacciones con el agua subterránea. Este modelo incorpora una técnica de asignación secuencial para que solo ciertos usos accedan a los recursos de algunas fuentes.
- LabSid-AquaNet [Alexandre y Porto, 1999] es un SSD basado en MODSIM, que está compuesto por diversos módulos para analizar: la gestión óptima de embalses, los aspectos económicos, la calidad del agua, los aspectos organizativos de la irrigación, etc. Está implementado en un entorno SIG, que hace más fácil y potente su uso. <http://www.phd.poli.usp.br/labsid/index.asp>
- MODSIM [Labadie, 1994, Labadie et al., 1984, Region, 2000, Fredericks et al., 1998] este es un SSD con múltiples módulos, basado en un modelo de simulación a escala mensual o semanal, la función objetivo está dada en términos de costos, y los repartos y almacenamientos de agua se hacen según una escala de prioridades dada por el modelador. <http://modsim.engr.colostate.edu/>
- REALM (REsource ALlocation Model) [VUT, 2001] es un modelo de simulación muy completo, aunque la interfaz de usuario no es agradable. Además de los elementos clásicos incluye la modelación de acuíferos y de calidad del agua. El acuífero se modela como un depósito: tiene asociada una curva V-profundidad, capacidad de comportarse como manantial (con vertidos), volumen máximo y mínimo y costo de extracción del agua. En cada paso de tiempo se realiza la optimización de la función objetivo en la red de flujo del sistema, mediante el algoritmo RELAX. La salida de resultados está preparada para ser post-procesada con Excel. <http://www.nre.vic.gov.au/vro/water>
- SimGes [Andreu et al., 1992] desarrollado por el DIHMA de la Universidad Politécnica de Valencia, y actualmente insertado, como un módulo más en el SSD Aquatool [Andreu et al., 1996]. SimGes permite modelar el uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas, para lo cual dispone de distintas formas de representar a los acuíferos. El modelo realiza la simulación del sistema de recursos hídricos a escala mensual, utilizando una red de flujo interna, la cual construye a partir de un esquema previamente definido por el usuario. El modelo optimiza los flujos por la red interna mes a mes con el algoritmo *out-of-kilter*, asignando el agua para los distintos usos, según un orden de prioridades de las demandas previamente establecido. El modelo también puede incluir dentro de la simulación procesos no lineales como la evaporación, y las pérdidas por infiltración en embalses y tramos de ríos. En la sección 5.1 se describe este programa con más detalle, porque forma parte de uno de los modelos desarrollados. <http://www.upv.es/aquatool/>

- SIMYLD-II [TWDB, 1972], modelo de paso mensual en que el modelador que simula el almacenamiento y la transferencia de agua entre los embalses, ríos y conducciones de un sistema, con el fin de satisfacer un conjunto de usos priorizados y unas reglas de operación dadas. El modelo realiza la simulación basándose en una representación numérica de la red de embalses y conducciones, la cual idealiza en una red ficticia compuesta por arcos y nudos. Las asignaciones del suministro a las demandas son el resultado de aplicar un algoritmo de programación lineal para minimizar la función objetivo dada en términos de costos y caudales circulantes por la red.
- SIM-V, derivado del anterior, y enfocado a la simulación de la operación de un sistema interconectado de embalses, plantas de generación hidroeléctrica, canales de bombeo, tuberías y tramos de ríos [Martin, 1983]; su estructura de trabajo es similar a la del modelo SIMYLD-II, disponiendo adicionalmente del algoritmo de optimización *out-of-kilter*, con el que se realiza la simulación. El modelo suele emplearse en análisis de operación de embalses a corto plazo. Los beneficios asociados a la producción hidroeléctrica, que resultan complejos de simular debido a sus no linealidades, se incorporan mediante la solución sucesiva de redes de flujo.
- WEAP [Raskin et al., 2001] enfocado a la evaluación y planificación hidrológica de cuencas. [Grigg, 1996] reseña el modelo, que trabaja con algoritmos de balance hídrico mediante redes de flujo, en las que tiene la posibilidad de considerar como elementos físicos del sistema, embalses, canales, tramos de ríos, tuberías y demandas, esencialmente. El modelo tiene la opción de simular procesos de flujo subterráneo.
<http://www.seib.org/weap>
- Otros modelos que simplemente se mencionan para no aburrir al lector son: NELUP (NERC-ESRC Land Use Program) [Dunn et al., 1996], TERRA (TVA Environment and River Resources Aid), DESERT (DEcision Support system for Evaluation of River basin sTrategies), CTIWM (CTI Water Management) [Ito et al., 2001], WATHNET [Kuczera, 1990, Dandy et al., 1997], RESQ [Ford, 1990], WUAM(The Water Use Analysis Model) [Kassem et al., 1994], y PRSYM.

Se puede apreciar que hay muchos modelos similares. Algunos tienen puesto el énfasis en las interacciones río-acuífero, otros incorporan la capacidad de simular simplificada-mente la calidad del agua, otros incorporan mecanismos de tránsito en canales, otros tienen algún mecanismo particular para establecer una correspondencia entre fuentes de agua y usos, etc.

En cuanto al aspecto y al manejo por parte del usuario, se encuentran desde los que funcionan en un entorno SIG, hasta los que funcionan en DOS, el otro extremo.

Pero todos ellos tienen la misma finalidad: predecir en la medida de lo posible las distintas consecuencias de actuaciones propuestas para ayudar a decidir la conveniencia de emprenderlas o no.

2.2. Revisión de métodos de optimización

Las técnicas de Investigación Operativa, Análisis de Sistemas o Programación Matemática permiten abordar científicamente multitud de problemas complejos de decisión. Estos problemas consisten en la coordinación de operaciones o actividades en una organización. Hay que observar y analizar la organización, abstraer la esencia del problema, y proponer nuevas formas de gestión que permitan conseguir mejores resultados para *toda* la organización.

En definitiva la Investigación Operativa se ocupa de la toma de decisiones óptimas, mediante la modelación matemática de sistemas deterministas o estocásticos que representan a problemas reales. En esta tesis, las decisiones se refieren a recursos naturales escasos, concretamente la asignación del agua; y el área de interés es la optimización determinista.

2.2.1. Optimización

Dentro de los problemas de decisión, los problemas de optimización consisten en seleccionar los valores de ciertas variables interrelacionadas, para minimizar o maximizar un objetivo, que mide o cuantifica la calidad de la decisión adoptada. Expresado matemáticamente:

$$\begin{array}{ll}
 \text{minimizar} & f(\mathbf{x}) \\
 \text{sujeto a:} & h_i(\mathbf{x}) = 0 \qquad i = 1, 2, \dots, m \\
 & g_j(\mathbf{x}) \leq 0 \qquad j = 1, 2, \dots, p \\
 & \mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \Omega
 \end{array} \tag{2.1}$$

Si se puede aislar y caracterizar un aspecto de un problema real por medio de una función objetivo, la optimización constituye un instrumento valioso de conceptualización y análisis.

Lógicamente, en los problemas complejos no se puede representar la totalidad de las interacciones entre variables, restricciones y objetivos, por lo que una determinada formulación del problema *siempre* debe considerarse una aproximación (mejor o peor) al problema real. Por ello quien aplica estas técnicas debe comprender el problema real, tener habilidad para realizar la formulación matemática del mismo, y buen juicio para interpretar los resultados, si se quiere conseguir un análisis exitoso.

La capacidad de formular adecuadamente un problema aumenta con la experiencia y con el conocimiento de la teoría, ya que se ha de conseguir un difícil balance: por un lado se desea un modelo que capture con precisión la complejidad del problema real, y también se desea que el modelo construido sea manipulable. La correcta formulación del problema hará posible su comprensión y solución.

Excepto para casos muy simples, los problemas de optimización no se pueden resolver analíticamente (de forma explícita¹), sino que hay que resolverlos mediante algoritmos

computacionales. El uso de estos algoritmos impone la necesidad de conocer mínimamente la teoría y las técnicas empleables, y justifica la inclusión de este apartado en esta tesis.

Primero se incluye una breve recopilación de conceptos de interés de programación lineal (PL), por ser la técnica más empleada de optimización.

En segundo lugar —la parte más importante de este apartado— se presentan aspectos de la programación no lineal (PNL): clases de problemas, algoritmos y dificultades. Finalmente se mencionan distintos códigos informáticos disponibles para la aplicación práctica de estas técnicas.

Los problemas de optimización se pueden clasificar bajo distintos criterios, dando lugar a diferentes tipos de sub-problemas: por la función objetivo en lineal o no lineal (y éstos a su vez en convexos o no convexos); por las restricciones en no restringidos, con restricciones lineales o con restricciones no-lineales; por los límites de las variables en restringidas o no restringidas, etc.

Problemas sin restricciones

Aunque parezca lo contrario, los problemas sin restricciones tienen interés teórico y práctico. Lo primero porque los algoritmos se verifican más fácilmente en problemas sin restricciones, antes de extenderse a los problemas restringidos. Lo segundo porque muchos problemas con restricciones pueden convertirse en otro problema sin estas restricciones, y luego resolverse por estos métodos. Por ejemplo el efecto de las restricciones de igualdad es limitar el grado de libertad del problema, al hacer unas variables función de otras. Si estas dependencias se pueden hacer explícitas, el problema se puede reducir a uno de menor dimensión.

Problemas con restricciones

Las restricciones (h_i y g_{ji} en la ecuación 2.1) suelen ser necesarias como una forma de acotar un problema que de otra forma resultaría demasiado complejo, limitando el estudio a un subproblema del problema total, que resulta entonces manejable.

Casi siempre se agregan hipótesis adicionales acerca de la continuidad de la función y/o su derivada, para garantizar que cambios chicos en el vector de variables ocasione un cambio también pequeño en el resto de los valores del problema. Entonces se trata de problemas de programación de variables continuas, más sencillos de resolver.

2.2.2. Programación lineal (PL)

La programación lineal (PL) es una forma sencilla de formular gran cantidad de problemas de optimización con poco esfuerzo. Como su nombre lo indica, tanto la función objetivo como las restricciones son funciones lineales de las variables.

¹Por ejemplo el óptimo de la función $f(x) = x^2 - x + 7$ se puede obtener de forma explícita.

La relación lineal [Luenberger, 1984] aparece porque muchas restricciones (como por ejemplo la ecuación de continuidad de la masa en el ámbito de este trabajo) *son* efectivamente relaciones lineales. En otras situaciones, aunque las relaciones reales sean no lineales, suele ser más cómodo definir las como lineales (a sabiendas del que se trata de una aproximación), que convencer a los demás de que una determinada forma más compleja es la mejor elección posible. En este sentido, la linealidad se elige como salida fácil para generalizar una única forma funcional aplicable a una clase de problemas similares.

La forma estándar de un problema de PL (en notación matricial) es la siguiente:

$$\begin{array}{ll} \text{minimizar} & \mathbf{c}^T \mathbf{x} = \sum c_i \cdot x_i \\ \text{sujeto a:} & \mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad \mathbf{A}(m \times n) \text{ y } \mathbf{b}(m) = b_1, b_2, \dots, b_m \\ & \mathbf{x} \geq \mathbf{0} \quad \mathbf{x}(n) = (x_1, x_2, \dots, x_n) \end{array} \quad (2.2)$$

Los problemas que no tienen esta forma estándar (con restricciones de desigualdad, por ejemplo), se pueden convertir fácilmente al formato anterior mediante algunas operaciones elementales.

Los aspectos teóricos y computacionales de la PL están bien desarrollados desde hace años, y se puede resolver rápidamente problemas de gran tamaño sin dificultades. El algoritmo simplex es el más difundido y utilizado, aunque también hay buenos algoritmos de punto interior, y otros adaptados a formulaciones especiales del problema.

Dentro del tema de la programación lineal hay varias clases de problemas que tienen una estructura especial. Estos problemas especiales tienen importancia por dos motivos: por un lado aparecen frecuentemente en problemas prácticos; y por otro lado han permitido avances teóricos y una comprensión más amplia y rica de los problemas lineales. Un problema especial de interés para esta tesis es el flujo en redes.

Las ventajas de la PL son [Sun et al., 1995]:

- Puede resolverse en tiempos razonables para problemas de grandes dimensiones.
- Obtiene un óptimo global (aunque puede haber otros puntos con igual valor de la función objetivo).
- No necesita encontrar un punto inicial, puesto que $\mathbf{x} = \mathbf{0}$ es un punto factible.
- Hay varios códigos disponibles para resolver esta clase de problemas.
- La solución está en la frontera de la región factible.

Además, la PL tienen dos propiedades interesantes: proporcionalidad y aditividad.

Proporcionalidad: esta propiedad descansa en la independencia de las variables entre sí, puesto que la contribución a la función objetivo de cada variable es: $c_k \cdot x_k$, y en cada restricción las variables también son independientes: $a_{ik} \cdot x_k$. Esto significa que no hay costos de inicio de actividad (costos fijos), y que la proporcionalidad se cumple en todo el rango válido de niveles de actividad ($l_i \leq x_i \leq u_i$), o dicho de otra forma, que los rendimientos marginales son constantes. El problema de los costos fijos se trata mediante la programación entera mixta.

Aditividad: esta propiedad deriva de la inexistencia de términos con productos cruzados tanto en la función objetivo como en las restricciones. Entonces estas funciones son separables expresables como sumatorias de la contribución de cada variable, de forma que el valor total es la suma de las contribuciones de todas las actividades individuales.

Estas propiedades hacen que sea muy fácil y cómodo “pensar” en forma lineal (proporcional y aditiva), pudiendo predecir (interpolar o extrapolar) resultados a partir de algunos resultados conocidos. Cuando estas propiedades no se cumplen, resulta mucho más difícil para el modelador estimar o predecir el comportamiento del sistema.

Dualidad

Asociado a todo problema de programación lineal existe otro problema lineal, denominado problema *dual*, muy relacionado con el problema original (*primal*), como se muestra seguidamente:

	PRIMAL		DUAL	
minimizar	$\mathbf{c}^T \mathbf{x}$	maximizar	$\lambda^T \mathbf{b}$	(2.3)
sujeto a:	$\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$	sujeto a:	$\lambda^T \mathbf{A} \leq \mathbf{c}^T$	
	$\mathbf{x} \geq \mathbf{0}$		$\lambda \geq \mathbf{0}$	

El vector \mathbf{x} es la variable del problema primal y el vector λ es la variable del problema dual. Ambos problemas son simétricos, que significa que mediante una serie de operaciones algebraicas se puede convertir un problema en el otro, y viceversa. El problema dual tiene tantas restricciones como variables el primal (n), y tantos términos en la función a maximizar como restricciones hay en el problema primal (m).

El teorema de dualidad de PL dice que si uno de los problemas de la ecuación 2.3 tiene una solución óptima finita, también la tiene el otro, y que los valores de las respectivas funciones objetivo son iguales: $\mathbf{c}^*{}^T \mathbf{x} = \lambda^*{}^T \mathbf{b}$.

Las variables del problema dual se interpretan como el precio marginal asociado a cada restricción del problema primal. Si $\lambda_i \neq 0$ esto significa que la i -ésima restricción es activa en el punto óptimo, y que el valor de la función objetivo cambiaría si se relajara esa restricción. El valor de λ_i es el “precio justo” que se pagaría por disponer de una unidad adicional de recurso en la restricción i . Por el contrario, el teorema de holgura complementaria dice que si en condiciones óptimas no se utilizan todas las unidades disponibles del recurso i , entonces el valor marginal de una unidad adicional λ_i es lógicamente cero.

Estos valores también sirven para realizar el análisis de sensibilidad de los coeficientes del lado derecho (o coeficientes de recursos): los mayores valores de λ_i indican los valores b_i más sensibles ante un cambio unitario.

El precio sombra es, pues, el valor verdadero de una unidad adicional de agua para un comprador en el lugar considerado.

Redes de flujo

Los problemas de redes surgen en gran variedad de situaciones reales. Por ejemplo, al dibujar la red hidrográfica de una cuenca en un plano, intuitivamente surge la posibilidad de representar ésta mediante una red de flujo, como muestra la Figura 2.2.

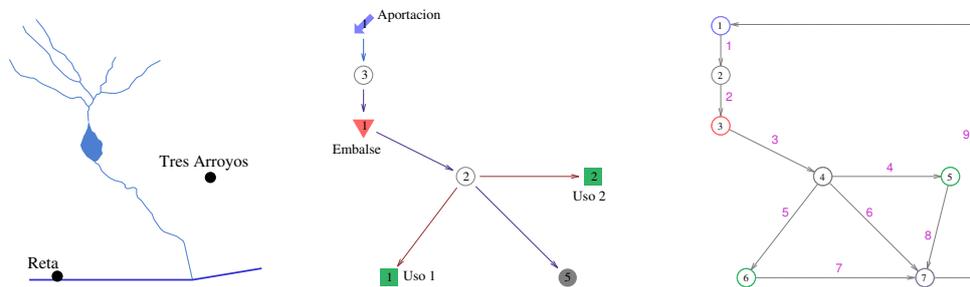


Figura 2.2: Red de flujo aplicada a un SRH

Una red de flujo, está formada por *arcos* orientados que conectan *nodos*. Los arcos se pueden numerar, o se pueden indicar por el par de nodos de origen y destino.

Algunos términos usados en la teoría de redes de flujo son:

- Una *cadena* es una sucesión de arcos que conectan dos nodos i y j .
- Un *ciclo* es una cadena que parte de un nodo y vuelve a él.
- Un grafo es *conexo* si hay una cadena entre dos nodos cualesquiera (un grafo es *conexo* si y sólo si contiene un árbol abarcador).
- Un *árbol* es un grafo conexo que no tiene ciclos.
- Un *árbol abarcador* es un árbol que llega a todos los nodos del grafo.

La representación mediante redes proporciona una ayuda conceptual, permitiendo visualizar las relaciones entre los componentes del sistema [Bazaraa y Jarvis, 1977].

Dentro de la teoría de redes se encuentran distintos tipos de subproblemas:

- ⇒ problema de flujo con costo mínimo.
- ⇒ problema de la ruta más corta.
- ⇒ problema de flujo máximo.
- ⇒ problema del transporte.
- ⇒ problema del trasbordo.
- ⇒ problema de asignación.

de los tipos de problemas anteriores, el de flujo con costo mínimo ocupa una posición central, ya que tiene una estructura general y unificadora, dentro de la cual pueden incluirse los restantes problemas como casos particulares [Hillier y Lieberman, 1991].

Como el problema de optimizar la asignación del agua entre distintos usos en un SRH puede formularse cómodamente bajo la estructura de un problema de flujo de costo mínimo, se centra la atención en este problema.

Tipos de redes

De acuerdo a ciertas características, hay distintos tipos de redes de flujo:

Una *red de flujo pura* es aquella que no tiene restricciones adicionales, sino las únicas restricciones son las propias de la red. Por el contrario, una *red de flujo generalizada* o red con restricciones de lado, es una red que sí tiene restricciones adicionales (además de las propias de la configuración de la red).

Una *red de flujo con ganancia* se caracteriza porque el flujo se incrementa a lo largo del arco ij en un factor γ , que puede ser mayor que 1 (ganancia) o menor que 1 (pérdida) indistintamente. Si $\gamma \neq 1$ las restricciones (de continuidad) de la red se reescriben así: $\sum x_{ij} - \sum \gamma_{ji} \cdot x_{ji} = b_i$.

Una *red de flujo conservativa* es aquella en la que en todos los nodos el balance de masa es nulo, o sea que $\mathbf{b} = \mathbf{0}$ en la ecuación 2.2.

Las redes de flujo se han incluido dentro del apartado de PL porque las restricciones de continuidad de la red son restricciones lineales. Evidentemente la optimización de una función no lineal en una red de flujo es un problema de PNL, pero aun así se ha preferido incluir el apartado de redes de flujo dentro de PL. Si la función objetivo es lineal, el problema se podrían resolver con el algoritmo simplex, pero hay algoritmos específicos para los distintos tipos de problema, que aprovechan las estructura especiales de éstos para conseguir un menor tiempo de cálculo.

Una red pura tiene una estructura más simple que una red generalizada, y si además es conservativa, más especial es la estructura, y los algoritmos específicos serán más rápidos y eficientes. Un problema de flujo mínimo lineal, se podría resolver con el algoritmo simplex tradicional, pero existe un algoritmo simplex para redes más rápido, y si la red es conservativa se puede emplear el algoritmo *out-of-kilter* que es más rápido todavía. Cuanto más grande sea el problema más se notará el ahorro en el tiempo de cálculo al usar el algoritmo más apropiado.

Problema de flujo en redes con costo mínimo

De forma general, el problema de encontrar el flujo que minimiza el costo en una red de m nodos y n arcos puede definirse así:

$$\text{Minimizar } \mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{c}^T \mathbf{x} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m c_{ij} \cdot x_{ij} \quad (2.4)$$

Sujeto a:

$\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}$ o $\sum_{j=1}^m x_{ij} - \sum_{k=1}^m x_{ki} = b_i$ ($i = 1, \dots, m$) : restricciones de continuidad

$\mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{ug}$ o $g_i(\mathbf{x}) \leq ug_i$ ($i = 1, \dots, p$) : restricciones adicionales

$\mathbf{l} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{u}$ o $l_i \leq x_i \leq u_i$ ($i = 1, \dots, n$) : restricciones de capacidad de los arcos

$\mathbf{x} \geq \mathbf{0}$ o $x_i \geq 0$ ($i = 1, \dots, n$) : restricciones de no-negatividad

Siendo:

\mathbf{x} : vector de flujos en los arcos de la red.

\mathbf{c} : vector de costos unitarios en los arcos de la red.

\mathbf{A} : matriz de incidencia nodos-arcos.

\mathbf{b} : vector de fuentes/sumideros.

\mathbf{l}, \mathbf{u} : vectores de límite inferior y superior de los flujos en los arcos.

\mathbf{ug} : vector de límite superior de las restricciones adicionales.

La matriz de incidencia \mathbf{A} es una matriz dispersa, en la que cada fila corresponde a uno de los m nodos, y cada columna a uno de los n arcos. En cada columna hay un +1 en la fila correspondiente al nodo de origen del arco, y un -1 en la fila del nodo de destino.

La matriz de incidencia de la red de flujo de la Figura 2.2 es:

nodo	arco								
	1	2	3	4	5	5	7	8	9
1	+1	0	0	0	0	0	0	0	-1
2	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0
3	0	-1	+1	0	0	0	0	0	0
4	0	0	-1	+1	+1	+1	0	0	0
5	0	0	0	-1	0	0	0	+1	0
6	0	0	0	0	-1	0	+1	0	0
7	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	+1

La matriz \mathbf{A} tiene rango $m - 1$ (porque la suma por columnas de todas las filas da el vector nulo) [Anton, 1997].

2.2.3. Programación no lineal (PNL)

La programación no lineal es necesaria cuando la aproximación lineal no puede representar adecuadamente las relaciones reales entre las variables. En problemas económicos, el comportamiento no-lineal es la regla, más que la excepción. La no linealidad de un problema puede estar causada por la función objetivo, por las restricciones, o por ambas [Scales, 1985].

Introducción a la PNL

La PNL es un área amplia, que comprende una gran variedad de problemas: la optimización no restringida, programación cuadrática, optimización linealmente restringida, problemas de mínimos cuadrados no-lineales (o ajuste de datos), optimización con restricciones de igualdad, programación convexa, etc. [Bliek, 2001]. También hay aplicaciones que requieren un tratamiento particular, como el control óptimo, diseño óptimo, identificación de parámetros, problemas inversos, optimización en finanzas, redes de flujo no-lineales y problemas de transporte, etc. Otros, tal vez menos clásicos, se están volviendo populares en la ingeniería ordinaria: métodos como derivadas libres, superficie de respuesta, modelación subrogada, mapeo espacial, etc. Es un campo muy activo de investigación, en el que se han realizado grandes progresos en los últimos años, y permanentemente hay avances interesantes en algoritmos y métodos numéricos.

En PNL no existe un único algoritmo (como el simplex en PL) que pueda resolver todos los problemas de este tipo; sino que hay algoritmos especializados que explotan las particularidades de cada tipo de problema para conseguir mejores resultados. Así, hay una interrelación entre el problema y el método de resolución: el algoritmo a emplear dependerá del tipo de función objetivo formulado, del tipo de restricciones, de la cantidad de variables de decisión (tamaño del problema), etc.; y al plantear un problema debemos tener presente con qué algoritmo lo podemos resolver.

Algunos de los tipos de problemas de PNL más comunes son los siguientes:

- Programación no lineal no restringida
- Programación no lineal linealmente restringida
 - general: si $g_i(\mathbf{x})$ son lineales
 - cuadrática: si además $f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n (c_i x_i + q_i x_i^2)$
- Programación no lineal convexa
 - general: si $f(\mathbf{x})$ y $g_i(\mathbf{x})$ son funciones convexas.
 - separable: si además $f(\mathbf{x})$ y $g_i(\mathbf{x})$ son funciones separables, o sea del tipo $f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n f_i(x_i)$.
- Programación no lineal no convexa
 - geométrica: si $g(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n c_i P_i(\mathbf{x})$, con $P_i(\mathbf{x}) = x_1^{a_{i1}} x_2^{a_{i2}} \dots x_n^{a_{in}}$
 - fraccional: si $f(\mathbf{x}) = \frac{f_1(\mathbf{x})}{f_2(\mathbf{x})}$

Complejidad de la PNL respecto a la PL

Evidentemente, los problemas no lineales son más complejos y difíciles de resolver que los problemas lineales, y sólo se recurre a ellos cuando con una formulación lineal no es posible representar adecuadamente el problema en cuestión [Winston, 1991].

Para ilustrar estas complejidades comparativas, es conveniente usar como ejemplo un problema de dos variables, en el que la región factible se puede representar en el plano, y la función objetivo se representa mediante curvas de isovalor o curvas de nivel. Las diferencias principales son:

- En PL los límites de la región factible son rectos, y el óptimo está en un vértice o en la frontera de dicha región (Figura 2.3[a]).
En PNL las restricciones no lineales hacen que los límites de la región factible no sean rectos; y si la función objetivo es no lineal, el óptimo no está necesariamente en un vértice o frontera de la región factible, sino que puede estar en un punto de la frontera (Figura 2.3[b1]) o en el interior de la región (Figura 2.3[b2]).

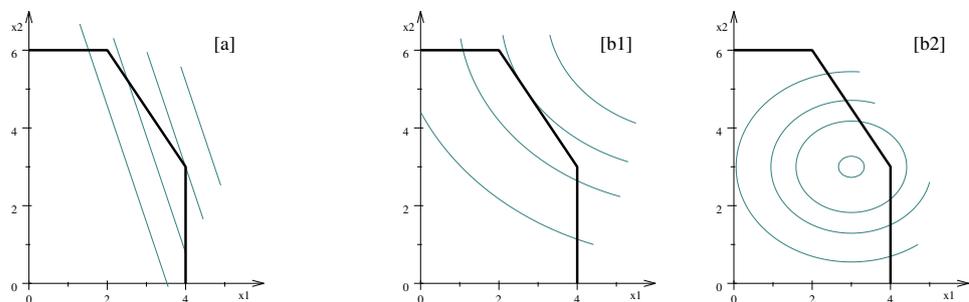


Figura 2.3: Ejemplo de comparación entre PL y PNL.

- En PNL, un máximo local no necesariamente es un máximo global. Esto sólo se garantiza si la función objetivo es cóncava y las restricciones son convexas. Este punto se desarrollará posteriormente con más detalle.

Estrategias de búsqueda de los algoritmos

La teoría y los algoritmos de optimización NL se desarrollaron de menor a mayor: primero para problemas de una variable y luego para varias variables, primero para optimización no restringida y luego para optimización restringida.

Actualmente, los algoritmos de PNL pueden clasificarse en 2 grandes grupos, según el tipo de búsqueda que realizan:

- algoritmos de gradiente o de descenso
- algoritmos metaheurísticos (o evolutivos)

Los **algoritmos de gradiente** (clásicos) son algoritmos iterativos², que buscan minimizar la función objetivo guiados por el gradiente (pendiente) de la función, y se detienen al llegar a un mínimo local. Los algoritmos de esta clase se engloban en la sub-área de *optimización no lineal local*, que es el área tradicional del Análisis Numérico, y que comparada con las otras sub-áreas es la más antigua y establecida. Pero, como su nombre lo indica, estos algoritmos obtienen un óptimo local, y no necesariamente el óptimo global del problema.

Por ejemplo, en la función de una variable de la Figura 2.4, el mínimo alcanzado dependerá del punto de inicio. Solo para algunos casos particulares, el óptimo global coincide con el local; para garantizar que la función tiene un único mínimo local en el dominio o región factible es necesario agregar una condición adicional respecto a la forma de la función, como se verá más adelante.

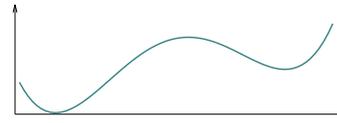


Figura 2.4: Función con dos mínimos locales.

Si la función no cumple esta condición (como en el ejemplo), queda como opción el comenzar la optimización desde muchos puntos iniciales distintos, y retener la solución que consiga el menor valor de la función, lo que resulta razonable si la función no tiene demasiadas “ondulaciones”. Pero de cualquier forma este procedimiento no asegura que se alcance el mínimo global, y puede requerir un esfuerzo computacional ingente en problemas complejos.

Los **algoritmos metaheurísticos** buscan el mínimo guiados por distintos procesos en los que hay un componente aleatorio, lo que permite que la búsqueda no se detenga en un mínimo local. Estos algoritmos surgieron para solventar el problema de los mínimos locales del grupo de algoritmos de gradiente. Sin embargo, el uso de éstos requiere establecer ciertos parámetros, que a la postre resultan determinantes en la consecución del mínimo, por lo que hace falta cierta experiencia por parte de quien aplica el algoritmo. Y aunque es posible que alcancen el mínimo global, nada asegura que efectivamente lo consigan. Son especialmente indicados cuando la función a minimizar no es continua.

Dentro de esta gran categoría se encuentran técnicas como los algoritmos genéticos, la búsqueda tabú, el recocido simulado, las redes neuronales artificiales, la lógica difusa, etc.

En el desarrollo de este trabajo se exploró la posibilidad y conveniencia de utilizar técnicas no convencionales, pero finalmente, se descartó esta opción por los siguientes motivos:

- por la alta dimensionalidad de los problemas a resolver.

²Iterativo significa que el algoritmo genera una serie de puntos factibles, y que cada punto se calcula a partir del punto anterior. Se comienzan las iteraciones en un punto inicial factible, que puede ser especificado por el usuario, o en algunos algoritmos puede ser generado mediante un procedimiento *ad-hoc*.

- porque una gran parte de los problemas que se pueden presentar en la práctica, se pueden manipular de forma de plantear un problema con un único mínimo. En los casos en que no se pueda asegurar un único mínimo, el modelador puede subdividir el problema en varios subproblemas que sí cumplan esta condición.

Condiciones de existencia del óptimo global

Retomando el tema de los algoritmos de gradiente, éstos se desarrollaron inicialmente para problemas de optimización no restringida, porque las condiciones de existencia de un óptimo global son para este caso menos exigentes que en el caso restringido. Posteriormente se extendieron a problemas restringidos con la adición de determinados mecanismos.

El Cuadro 2.1 resume las condiciones necesarias y suficientes para la de existencia de un óptimo global en distintos tipos de problemas de PNL.

problema	condición necesaria	también suficiente si
una variable, no restringido	$df(x)/dx = 0$	$f(x)$ convexa
varias variables, no restringido	$\partial f(x)/\partial x_j = 0 \quad (j = 1, \dots, n)$	$f(x)$ convexa
varias variables, restringido con $\mathbf{x} \geq \mathbf{0}$	$\partial f(x)/\partial x_j = 0 \quad (j = 1, \dots, n)$ $x_j \partial f(x)/\partial x_j = 0$	$f(x)$ convexa
varias variable, restringido general	condiciones de Karush-Kuhn-Tucker	$f(x)$ convexa $g_i(x)$ convexas ($i = 1, \dots, m$)

Cuadro 2.1: Resumen de las condiciones del óptimo global en PNL.

Función convexa

Una **función de una variable** $f(x)$ es *convexa*³ si el segmento que une dos puntos cualesquiera de la función se encuentra sobre la gráfica o por arriba de ésta. Matemáticamente: $f(x)$ es convexa si para cualquier x_1, x_2 y $0 \leq \alpha \leq 1$ se verifica que:

$$f(\alpha x_1 + (1 - \alpha)x_2) \leq \alpha f(x_1) + (1 - \alpha)f(x_2)$$

Por lo tanto una recta es una función tanto convexa como cóncava, mientras que una vivorita no es ni convexa ni cóncava. En el punto mínimo se cumplen las siguientes condiciones:

- la primera derivada es nula: $df(x)/dx|_{(x=x^*)} = 0$
- la segunda derivada es no negativa: $d^2 f(x)/dx^2|_{(x=x^*)} \geq 0$

En el caso de una **función de varias variables** $f(\mathbf{x}) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, la definición de convexidad es simplemente la generalización de la definición anterior a un espacio de

³Si el signo \leq en la fórmula se reemplaza por el signo $<$, entonces $f(x)$ es *estrictamente* convexa.

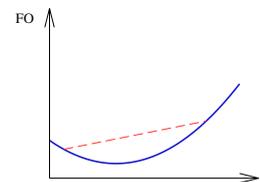


Figura 2.5: Ejemplo de función convexa

n dimensiones. Un resultado importante es que la combinación de funciones convexas produce funciones también convexas.

En el punto mínimo se cumplen las siguientes condiciones:

- el vector gradiente es igual que cero: $\nabla f(\mathbf{x})|_{(x=x^*)} = 0$
- la matriz hessiana, es semidefinida positiva⁴: $\nabla^2 f(\mathbf{x}) = [\partial^2 f(\mathbf{x})/(\partial x_i \partial x_j)]|_{(x=x^*)}$ es semidefinida positiva, o expresado de otra forma: $\det(\nabla^2 f(\mathbf{x})|_{(x=x^*)}) \geq 0$

La matriz hessiana es la generalización del concepto de curvatura para un espacio de n dimensiones; su estructura influye sensiblemente en la tasa de convergencia de los algoritmos de minimización.

Condiciones de Karush-Kuhn-Tucker

Sea \mathbf{x}^* un punto regular para las restricciones, si este punto es un mínimo relativo del problema de la ecuación 2.1, entonces:

$$\begin{aligned}
 &\text{existe un vector } \lambda \in \mathbf{E}^m \\
 &\text{y un vector } \mu \in \mathbf{E}^p \text{ con } \mu \geq \mathbf{0} \\
 &\text{tal que:} \\
 &\quad \nabla f(\mathbf{x}^*) + \lambda^T \nabla \mathbf{h}(\mathbf{x}^*) + \mu^T \nabla \mathbf{g}(\mathbf{x}^*) = \mathbf{0} \\
 &\quad \mu^T \mathbf{g}(\mathbf{x}^*) = 0
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

Las variables λ y μ corresponden a las variables duales de PL⁵, y tienen la misma interpretación económica de precios marginales de las restricciones, ya que son multiplicadores de Lagrange.

Multiplicadores de Lagrange

El problema con restricciones se suele escribir así:

$$\begin{array}{llll}
 \text{minimizar} & f(\mathbf{x}) & & \\
 \text{sujeto a:} & \mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}, & \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0} & \begin{array}{l} \text{restricciones funcionales} \\ \text{restricciones de conjunto} \end{array} \\
 & \mathbf{x} \in \Omega & &
 \end{array}$$

Los puntos que cumplen las restricciones son *puntos factibles*.

En los problemas con restricciones, un concepto importante es el de *restricción activa*. Una restricción de desigualdad $g_i(\mathbf{x}) \leq 0$ es activa en el punto factible \mathbf{x} si $g_i(\mathbf{x}) = 0$, y es inactiva si $g_i(\mathbf{x}) < 0$. Las restricciones activas en el punto factible \mathbf{x} restringen el

⁴Una matriz \mathbf{A} es semidefinida positiva si $\mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x}$ es positiva para todo \mathbf{x} no nulo, o lo que es lo mismo, si su determinante $\det(\mathbf{A}) \geq 0$. Si una matriz \mathbf{A} es definida positiva todos sus autovalores son positivos.

⁵se han separado en 2 vectores por simplicidad, para manejar separadamente las restricciones de igualdad de las de desigualdad.

dominio de factibilidad en las proximidades de dicho punto, mientras que las restricciones inactivas no ejercen influencia en el entorno del punto.

Lógicamente no se sabe a priori qué restricciones serán activas en la solución. Si esto se supiera, se trabajaría solamente con las restricciones activas modificadas como restricciones de igualdad.

Puede demostrarse que si \mathbf{x}^* es un punto extremo local sujeto a $\mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$ y \mathbf{x}^* es un punto regular de estas restricciones, entonces existe un $\lambda \in E^m$ tal que:

$$\nabla f(\mathbf{x}^*) + \lambda^T \nabla \mathbf{h}(\mathbf{x}^*) = \mathbf{0} \quad (2.6)$$

Esta condición junto con las restricciones del problema original forman un sistema de $n + m$ ecuaciones de $n + m$ variables (las de \mathbf{x}^* , λ). λ es el vector de *multiplicadores de Lagrange* asociado al problema con restricciones.

Se puede entonces reescribir el problema original como un problema que tiene un mayor número de variables, ya que lo que antes eran restricciones se han incorporado a la función objetivo:

$$l(x, \lambda) = f(x) + \lambda^T h(x)$$

que tiene un mínimo local donde se satisfacen las siguientes condiciones:

$$\nabla_{\mathbf{x}} l(\mathbf{x}, \lambda) = \mathbf{0}$$

$$\nabla_{\lambda} l(\mathbf{x}, \lambda) = \mathbf{0}$$

O sea que el problema aumenta de tamaño introduciendo una variable adicional por cada restricción de igualdad.

Los multiplicadores de Lagrange asociados a un problema de minimización con restricciones tienen una interpretación como precios, análoga a los precios asociados a las restricciones en programación lineal. En el caso no lineal, los multiplicadores están asociados con el punto solución determinado, y son los precios marginales (precios asociados a pequeñas variaciones en las restricciones). Por lo tanto el valor de estos multiplicadores no puede ser negativo.

Programación separable

Como se mencionó anteriormente, estos subproblemas se ajustan al siguiente formato:

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n f_i(x_i)$$

$g_i(\mathbf{x})$ son funciones convexas

Estos problemas satisfacen la propiedad de aditividad, pero no la de proporcionalidad (ya que $f_i(x_i)$ son funciones no lineales). La suposición de aditividad se cumple porque las variables no están vinculadas en la función objetivo, ni en las restricciones.

Estos problemas presentan una estructura especial, que se aprovecha para su resolución de dos formas:

- a Un problema de PNL separable se puede aproximar tanto como se quiera mediante un problema de PL de mayor tamaño, así como se puede aproximar una función compleja por pequeños segmentos lineales. Esto permite usar el método simplex u otros similares [Hochbaum y Shanthikumar, 1990].
- b Aprovechar esta estructura especial para construir algoritmos especiales de PNL para esta clase de problemas. A este grupo pertenecen los algoritmos utilizados en este trabajo.

2.2.4. Códigos de algoritmos

Al comenzar este trabajo se recopiló información acerca de distintos códigos de algoritmos disponibles para resolver los distintos tipos de problemas. Como puede verse en [More y Wright, 1993], existe una gran cantidad de algoritmos, por lo que no se pretende que esta revisión sea exhaustiva sino más bien ilustrativa de algunos de los algoritmos actualmente disponibles.

Las características más importantes de los códigos de algoritmos para este trabajo fueron las siguientes tres:

- capacidad para tratar problemas grandes.
- gratuidad del algoritmo (y preferentemente disponibilidad de su código).
- sistema operativo en el que funciona.

Respecto a la primera característica, una buena definición de problemas grandes dice que son aquellos en los que vale la pena aprovechar ciertas propiedades estructurales del problema para conseguir menores tiempos de cálculo. Otros autores [Benson et al., 2001] agrupan en esta categoría a problemas con más de 1000 incógnitas. Los algoritmos para problemas grandes se espera que sean eficientes en el uso de memoria y la ordenación de datos y variables.

La gratuidad del algoritmo es difícil de conseguir para algoritmos eficientes. A lo largo de este trabajo se ha comprobado —tristemente— que los algoritmos gratuitos no resultaron confiables al intentar resolver problemas de gran tamaño. La disponibilidad del código del programa es aun más rara.

Otra dificultad importante es que la mayoría de los matemáticos que desarrollan estos programas trabaja en entorno Unix, con lo cual los programas no pueden ejecutarse en PCs. Esto también constituye una limitación importante puesto que la mayoría de las versiones libres funcionan bajo el mencionado entorno.

Lenguajes de modelación

Esos programas son entornos en los cuales se formula de forma muy sencilla un problema de optimización (mediante su propio lenguaje de escritura), para posteriormente ser resuelto con alguno de los múltiples algoritmos que trabajan en dicho entorno.

Estos entornos son todos de pago, y permiten utilizar diversos algoritmos incorporados. Ejemplo de estos programas son AMPL, CUTE o GAMS. En particular interesa el entorno GAMS [Brooke et al., 1996] fue utilizado en esta tesis para verificar los resultados obtenidos con el algoritmo incorporado al programa. Para problemas no lineales dispone de tres algoritmos: MINOS, SNOPT y CONOPT2. <http://www.gams.de>

Códigos de algoritmos lineales

Aunque no nos detendremos en los problemas lineales por ser un tema más conocido, dentro de los códigos para problemas de PL generales se puede mencionar a CPLEX, HOPDM [Gondzio, 1995], PCx [Coleman et al., 1997], BPMPD [Mészáros, 1998], LP_SOLVE, XLSOL, FortMP, etc.

Mientras que para problemas en formato de redes de flujo los códigos más difundidos son los siguientes:

- RELAX-IV [Bertsekas, 1991] permite resolver problemas de redes con ganancias en redes puras.
- Out-of-kilter [Bazaraa y Jarvis, 1977] para problemas lineales en una red pura y conservativa. Este resulta especialmente destacable porque es el que se utiliza en el programa SimGes, como se verá en la sección 5.1.
- NETFLO [Helgason y Kennington, 1980] es un código de pago, que permite resolver redes de flujo con restricciones adicionales (o generalizadas).
- EMNET [McBride, 1985] algoritmo para problemas lineales en una red de flujo generalizada.
- MCF [Löbel, 1998] es un algoritmo simplex primal que trabaja en redes de flujo.

Códigos de algoritmos no lineales

Dentro de esta categoría hay una gran cantidad de algoritmos. Como se mencionó con anterioridad, cada uno de ellos trabaja eficientemente en ciertas condiciones, por lo que conviene seleccionar el más apropiado al problema que se debe resolver. Son numerosos los trabajos en los que se compara la eficiencia de distintos algoritmos [Benson et al., 2001]. Algunos de los códigos de esta categoría son:

- CONOPT2 es recomendable para problemas con muchas restricciones lineales, para problemas en los cuales hay muchas ecuaciones que pueden ser resueltas una a una, y

para problemas grandes y/o dispersos (como el que hay que resolver en los modelos propuestos); mientras que para problemas densos su rendimiento disminuye mucho. <http://www.conopt.com/>

- DONLP2 resuelve una función objetivo NL diferenciable con restricciones no lineales. Solo ejemplos para problemas chicos y medianos (300 incógnitas), mediante el método de programación secuencial cuadrática (PSQ). <ftp://plato.la.asu.edu/pub/ampl/>
- KNITRO [Waltz y Nocedal, 2003] es un algoritmo que emplea métodos de punto interior (o de barrera) y conjuntos activos para encontrar el óptimo en problemas muy grandes. Utiliza información del hessiano para acelerar la convergencia hacia el mínimo local. <http://www.ziena.com/knitro/kindex.htm>
- LANCELOT [Conn et al., 1992] paquete para Unix, desarrollado por un conjunto de universidades europeas, y que comprende un gran número de subrutinas para resolución de distinta clase de problemas no lineales en la función objetivo y las restricciones. <http://www.cse.clrc.ac.uk/Activity/LANCELOT/>
<http://www.cse.clrc.ac.uk/nag/lancelot/lancelot.shtml>
- LSNNO [Toint y Tuyttens, 1992, Toint y Tuyttens, 1990] optimiza una función separable dos veces continuamente diferenciable dentro de la región factible. Las derivadas de la función pueden ser calculadas de forma analítica o numérica; y se realiza una transformación lineal previa para reducir el número de variables activas, lo cual reduce el tiempo de cálculo. Es especialmente indicado para resolver problemas de gran tamaño. <ftp://plato.la.asu.edu/pub/ampl/>
- LOQO [Vanderbei, 1997] es otro algoritmo apto para funciones suaves y dos veces continuamente diferenciables, que trabaja con un mecanismo de punto interior aplicado a una secuencia de aproximaciones cuadráticas del problema formulado. <http://www.orfe.princeton.edu/loqo/>
- MINOS (Module Incore Nonlinear Optimization Solver) [Murtgah y Saunders, 1987] es uno de los algoritmos más difundidos, por lo que es habitual que sea usado en pruebas comparativas contra otros algoritmos. <http://www.sbsi-sol-optimize.com/>
- PFNRN [Mijangos, 2000] este algoritmo resuelve problemas de redes de flujo no lineales, con o sin restricciones lineales o no-lineales. Sus autores reportan un comportamiento superior al de MINOS. Este programa se ejecuta en entorno Unix, y su código no es público. Estas dos razones fueron las que desaconsejaron el uso de este algoritmo, que en principio parecía ser una opción interesante.
- SSCNO optimización de problemas de gran escala estrictamente convexos en redes de flujo. Código no disponible. <http://computation.pa.msu.edu/NO/>
- NLPHOPDM [Epelly O. y Vial, 2000] es un algoritmo de punto interior construido como una ampliación de HOPDM, apto para funciones objetivo continuas, con restricciones lineales o no lineales.

Direcciones web de interés

En las siguientes direcciones de internet se puede encontrar información de utilidad sobre distintos algoritmos:

- <http://www.ampl.com/solvers.html>
- <http://www.netlib.org/opt>
- <http://orlab.snu.ac.kr/software/index.html>

Comentario finales acerca de los algoritmos

La gran cantidad de algoritmos existentes para problemas no lineales, viene a demostrar en cierta medida, que ésta es un área muy activa dentro de la programación matemática.

Para finalizar esta sección, hay que decir que las tres condiciones pedidas en el inicio al algoritmo a utilizar, son realmente muy exigentes. Fue necesario un trabajo de prueba y comparación del funcionamiento de distintos códigos, que consumió muchas horas y pruebas, que se hubieran evitado si se hubiera dispuesto de los paquetes de optimización de pago.

El algoritmo LSNNO fue el utilizado en el programa de optimización desarrollado, como se verá en la sección 4.3.3.

2.3. Revisión de conceptos económicos

Esta sección expone una serie de conceptos económicos simples, destinado a no economistas, tal cómo se encuentra en cualquier libro básico de economía. Aquí se ha seguido a [Fischer et al., 1989]. A quienes no tienen afianzados conocimientos económicos les ayudará a entender los alcances, capacidades y limitaciones de los modelos presentados en esta tesis.

La economía estudia la producción de bienes y servicios en la sociedad, que dispone de recursos limitados (o escasos); e intenta ayudar a responder a tres preguntas fundamentales:

- *qué* bienes o servicios producir con los recursos disponibles.
- *cómo* producirlos.
- *para quién* producirlos.

La ciencia económica se divide en dos grandes campos: economía positiva y economía normativa.

- La economía positiva busca explicaciones objetivas y científicas sobre el funcionamiento de la economía; como por ejemplo que al aplicarse un impuesto a los cigarrillos baja su consumo.
- La economía normativa prescribe acciones basándose en la economía positiva y en juicios de valor personales (políticos), y por lo tanto es más subjetiva; como por ejemplo si debería aplicarse (o no) un impuesto a los cigarrillos.

En este trabajo se aplican los métodos de observación y análisis de la economía positiva, en particular el concepto de eficiencia económica, para analizar un SRH y comparar diferentes asignaciones de recursos, con el fin de encontrar aquella produce menos despilfarro de recursos.

Se verá en el resto de la sección que la conducta de las empresas puede estudiarse bajo el supuesto de que éstas intentan maximizar sus beneficios o ganancias; mientras que la conducta de los individuos puede estudiarse bajo el supuesto de que éstos buscan maximizar su utilidad.

2.3.1. Modelo económico neoclásico

El modelo económico neoclásico es el actualmente dominante en la mayoría de los países occidentales, y dentro de éste se enmarcará el presente trabajo. El modelo neoclásico se basa en unas pocas pero importantes premisas:

1. La distribución de la renta se asume como dada. Los cambios en la distribución de la renta hacen cambiar la demanda de los distintos bienes y servicios. En una economía con una distribución de renta muy desigual puede ser económicamente eficiente producir yates, y no producir vacunas contra la malaria.
2. Los consumidores (o usuarios) son los mejores jueces de su propio bienestar. Esto hace que no interese conocer el por qué de la conducta de los consumidores, sino solamente conocer la magnitud de su respuesta. Esto constituye el enfoque de la preferencia revelada, por el cual la conducta de los consumidores se puede deducir suponiendo que estos hacen elecciones coherentes entre los distintos bienes y servicios que pueden comprar. *Coherencia* significa en este contexto que las elecciones de los consumidores son estables a lo largo del tiempo, lo cual es válido si se trabaja con el comportamiento medio y con periodos de tiempo prolongados.
3. No se consideran los efectos fuera de la zona de análisis. Una vez definido el sistema a estudiar (y los límites de este) se han de introducir mediante algún mecanismo elementos que limiten los perjuicios causado en el exterior del sistema.

El modelo neoclásico se basa en la existencia de los mercados, y en la intervención reguladora del Estado.

El mercado es un **sistema de asignación de recursos**. No es el único: está también la economía dirigida, en la que los poderes del Estado determinan en gran medida la asignación de los recursos, relegando al mercado a un papel secundario. Este es el mecanismo de asignación más frecuentemente encontrado para el agua.

Conducta humana

La economía estudia el comportamiento de la sociedad en lo referente a su organización productiva. Evidentemente, el comportamiento de un grupo social cambia con el tiempo, y tiene dispersiones mucho mayores que las usualmente manejadas en ingeniería. Estas características, inherentes a las ciencias sociales, hay que conocerlas y asumirlas como inevitables.

Análisis marginal

Un principio económico importante que se aplica a la toma de decisiones de asignación de recursos es el análisis marginal de costos frente a beneficios. Para decidir si se debe emprender o no una acción determinada, sólo es adecuado comparar las cosas que cambiarán con y sin dicha acción.

Por ejemplo, una empresa que quiera decidir su nivel de producción compara los costos y los beneficios de producir una unidad más en distintos niveles de producción.

Frontera de posibilidad de producción

La frontera de posibilidades de producción (FPP), también llamada frontera de eficiencia, muestra la cantidad máxima que se puede producir determinados bienes o servicios en una economía determinada (con los recursos y conocimientos de que ésta disponga). La Figura 2.6 muestra esta frontera para una economía hipotética en la que sólo se pueden producir dos bienes: arroz o naranjas.

En cualquier punto en la zona interior a la curva hay despilfarro de recursos en la economía; la zona exterior es imposible de alcanzar con los recursos y los conocimientos disponibles. Los puntos de la curva son puntos sin despilfarro, eficientes en el sentido de Pareto.

Cualquier punto en la zona interior es susceptible de mejorar su eficiencia en el sentido de Pareto, puesto que es posible conseguir puntos en los que aumente la producción de arroz o de naranjas, sin que disminuya la producción del otro (zona gris).

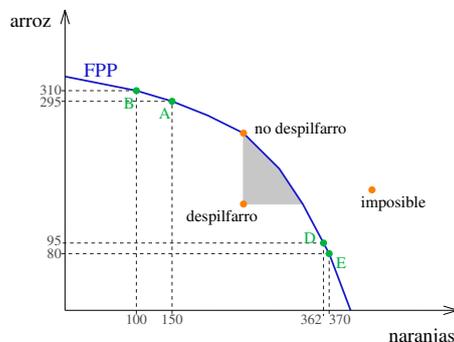


Figura 2.6: Curva FPP (frontera de posibilidad de producción).

Por el contrario, en una situación de eficiencia (sobre la curva FPP), el aumentar la cantidad de un bien implica necesariamente disminuir la cantidad del otro. Esto tiene que ver con el costo de oportunidad.

Coste de oportunidad

El coste de oportunidad de un bien o servicio es la cantidad de otros bienes o servicios a los que hay que renunciar para obtenerlo.

Por ejemplo, en la economía hipotética de la Figura 2.6, el costo de oportunidad de pasar de A a B (y conseguir 15 unidades adicionales de arroz) es de 50 unidades de naranjas. De igual forma, el costo de oportunidad de pasar de D a E (y conseguir 15 unidades adicionales de arroz) es de 8 unidades de naranjas. La pendiente de la frontera de posibilidad de producción es la responsable del mayor costo de oportunidad de producir 15 arroz cuanto más arroz se produce. Esto refleja que ambas “industrias” tienen rendimientos decrecientes.

Sustitución de recursos

Esto significa que tanto consumidores como productores no están obligados a utilizar proporciones fijas de recursos para su consumo o actividades productivas, sino que tienen capacidad de adaptarse ante situaciones de escasez, sustituyendo unos recursos por otros.

2.3.2. Modelo básico de oferta y demanda

El modelo económico básico de oferta y demanda se usa para predecir el precio y la cantidad intercambiada en estados de equilibrio.

La aplicación de este modelo se basa en el hecho —más que demostrado— que la cantidad ofrecida y la demandada dependen sustancialmente del precio.

Mercado

Un mercado es el conjunto de mecanismos mediante los cuales compradores y vendedores de un bien entran en contacto para comerciarlo.

Un mercado se define en relación a un conjunto de productos parecidos. Por ejemplo, el agua apta para beber no pertenece al mismo mercado que el agua utilizada para regar, mientras que el agua para potabilizar sí que pertenece a ese mercado.

Curva de demanda

La curva de demanda es la relación entre el precio de un bien y la cantidad demandada. Esta curva describe el comportamiento de los consumidores (reales y potenciales) ante variaciones en el precio del bien en cuestión. Esta curva es descendente (Figura 2.7), puesto que si el precio baja, se demanda una cantidad mayor.

Es importante distinguir entre cantidad *demandada* y cantidad *consumida* realmente. La cantidad demandada depende únicamente de los consumidores (de sus gustos, ideas, intereses, etc.) mientras que la cantidad consumida depende de la interrelación de la demanda y la oferta, como se verá en la sección 2.3.2.

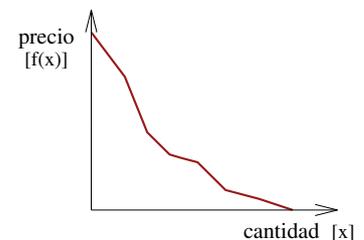


Figura 2.7: Curva de demanda.

Los factores que influyen en la cantidad demandada de un bien (el agua) son:

- el precio, que como se dijo antes, es el factor más importante.
- el precio de los bienes relacionados (sustitutos o complementarios); por ejemplo el precio de la tierra apta para regadío.
- la renta de los consumidores. Especialmente en el uso doméstico puertas afuera.
- los gustos de los consumidores.
- los precios (o la escasez) esperados para el futuro.

Como el factor que más influencia tiene es el precio, la curva de demanda suele trazarse en función del precio, suponiendo que los restantes factores listados (o factores

subyacentes) no se modifican. Esto es una simplificación práctica, pero hay que tener en mente que cambios en estos factores hacen cambiar también la curva de demanda.

La curva de demanda representa lo que están dispuestos a pagar los usuarios de agua para conseguir una determinada cantidad de esta. También puede verse como la disposición de los usuarios a aceptar compensaciones por reducir su consumo de agua.

La curva de demanda puede abarcar un individuo, un grupo de individuos, o toda la sociedad. La curva del mercado de un bien privado se obtiene sumando en horizontal las curvas de demanda de todos los usuarios/compradores potenciales del mercado, tal como muestra la Figura 2.8.

Es conveniente sumar (o agregar) las curvas de demanda de los usuarios que tienen un patrón similar de consumo, para reducir la cantidad de elementos a analizar sin incurrir en errores en la representación de su comportamiento.

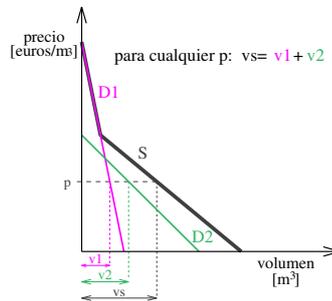


Figura 2.8: Suma de curvas de demanda de un bien privado.

En el caso del agua, se debe trabajar con curvas de demanda independientes para usuarios domésticos, industriales y agrícolas como mínimo, ya que presentan un comportamiento muy distinto. También si los usuarios agrícolas cultivan plantas distintas, o su sistema de aplicación, forma de trabajo, etc. es diferente, estas particularidades aparecerán reflejadas en las distintas curvas de demanda.

Elasticidad de la demanda

La elasticidad-precio es una medida de la sensibilidad de la cantidad demandada ante un cambio en el precio, y da idea de la sustituibilidad del bien considerado. Se define como:

$$\epsilon = \frac{\Delta \text{cantidad} \%}{\Delta \text{precio} \%} = \frac{\Delta \text{cant.} / \text{cant.}}{\Delta \text{precio} / \text{precio}} = \frac{\Delta \text{cant.}}{\Delta \text{precio}} \cdot \frac{\text{precio}}{\text{cant.}} \quad (2.7)$$

El punto de $\epsilon = -1$ es un punto particularmente importante, porque en dicho punto los vendedores maximizan su ingreso.

Como se ve en la fórmula anterior, la elasticidad no es la pendiente de la curva de demanda. Para una curva de demanda recta (Figura 2.9) la elasticidad depende del punto considerado (la curva de elasticidad constante es una exponencial).

Por ejemplo el agua usada para beber, tiene una elasticidad muy pequeña (es inelástica), porque aunque cambie bastante el precio, la cantidad demandada cambiará muy poco. Por el contrario, el agua utilizada para lavar aceras y calles tiene una elasticidad alta (es muy elástica), porque si aumenta el precio (la escasez), estas se lavarán con menos frecuencia, reduciendo mucho la cantidad utilizada.

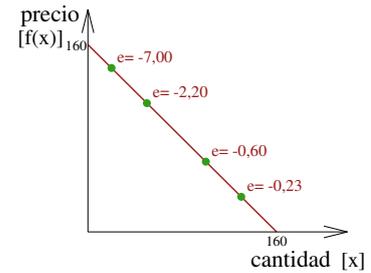


Figura 2.9: Variación de la elasticidad sobre una curva de demanda recta.

Conducta de los consumidores

La conducta de los consumidores se estudia mediante la teoría de la preferencia revelada. Ésta teoría deduce la conducta del consumidor —las elecciones de compra que éste realiza— asumiendo únicamente que sus preferencias son coherentes entre los bienes que pueden comprar. Se entiende por preferencias coherentes que las decisiones de consumo (o preferencias) son estables a lo largo del tiempo.

A partir de la premisa anterior, los individuos intentan maximizar su bienestar (o utilidad) en base a sus preferencias de consumo.

Curvas de indiferencia

Supongamos por simplicidad que el consumidor sólo puede elegir entre 2 bienes A y B, de forma que las posibles opciones de consumo son puntos en un gráfico bidimensional.

Las curvas punteadas de la Figura 2.10 se denominan curvas de indiferencia y unen puntos que le reportan igual utilidad al consumidor.

Estas curvas verifican 4 reglas:

1. no se cortan.
2. las curvas exteriores corresponde a niveles más altos de utilidad.
3. tienen pendiente negativa.
4. son cada vez más planas al aumentar la cantidad.

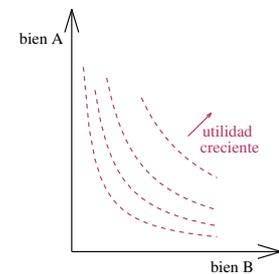


Figura 2.10: Curvas de Indiferencia.

La pendiente de la curva de indiferencia es la relación marginal de sustitución (r.m.s.) entre el bien B y el bien A, y es distinta a lo largo de la curva. Indica a cuántas unidades

de B está dispuesto a renunciar el consumidor, para conseguir una unidad más de A sin cambiar su utilidad.

La relación marginal de sustitución decreciente (punto 4 anterior) deriva de la utilidad marginal decreciente que obtienen los individuos del consumo de los distintos bienes. La utilidad marginal de un bien es la utilidad que reporta el consumo de una unidad adicional. Las preferencias de la mayoría de los individuos son coherentes con el principio de utilidad marginal decreciente: el primer trago de agua apetece más que el segundo, y así siguiendo hasta que no apetece más.

La relación marginal de sustitución es igual al cociente de las utilidades marginales de los bienes:

$$r.m.s. = \frac{UM_B}{UM_A} \tag{2.8}$$

Restricción presupuestaria

La restricción presupuestaria (o de renta) determina las combinaciones de bienes y servicios que puede comprar el consumidor.

La recta continua de la Figura 2.11 representa una restricción presupuestaria (obsérvese la similitud conceptual de esta figura con la Figura 2.6, el sentido que aquí también los puntos exteriores son inalcanzables, y que curvas más exteriores representan mayor capacidad presupuestaria.)

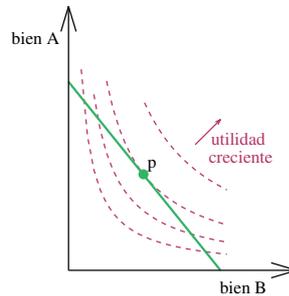


Figura 2.11: Restricción presupuestaria del consumidor.

¿Qué cantidades de A y de B elegirá el consumidor para maximizar su utilidad?

La combinación de A y B que le permita alcanzar la curva más exterior de utilidad es la representada por un punto *p*, tangente a una curva de utilidad. En este punto el cociente entre utilidad marginal y precio para los dos bienes es igual:

$$\frac{UM_A}{P_A} = \frac{UM_B}{P_B} \tag{2.9}$$

Es la utilidad marginal —y no la total— la que guía la conducta de los consumidores.

Por lo tanto, en las decisiones de los consumidores sólo son importantes los precios relativos y la renta real (cantidad de bienes que puede comprar). Si se duplicara la renta del consumidor y también los precios de ambos bienes, la combinación de bienes elegidos sería la misma.

Subida del precio de un bien

En la Figura 2.12 se representa la suba del precio del bien B mediante un giro de la recta de restricción presupuestaria, que pasa a ser la línea gruesa. El nuevo punto de elección también cumple la relación de igualdad entre utilidades marginales y precios antes mencionada.

Esta suba reduce la renta real del consumidor y obliga a cambiar la elección anterior, reduciendo la cantidad consumida del bien B (efecto renta).

También provoca el alza del precio relativo de B respecto de A, que reduce más aún el consumo (efecto sustitución).

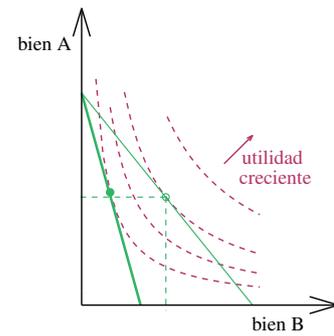


Figura 2.12: Efecto del aumento del precio del bien.

La conjunción del efecto renta y del efecto sustitución son los que justifican que la curva de demanda (Figura 2.7) sea monótonamente decreciente (ley de la demanda).

Curva de oferta

La cantidad ofertada de un bien también depende del precio (Figura 2.13). Esta relación se denomina curva de oferta, y es monótonamente creciente.

Los factores que influyen en la cantidad ofertada son:

- el precio (el factor que tiene más influencia).
- las activos productivos duraderos (maquinarias).
- las tecnologías existentes.
- los precios de los insumos.

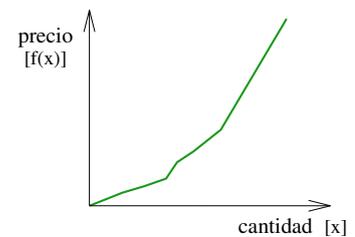


Figura 2.13: Curva de oferta.

De forma similar a lo que sucede con la curva de demanda, la curva de oferta se traza asumiendo que los 3 últimos factores (factores subyacentes) no se modifican significativamente. De todas formas es necesario tener presente que estos factores pueden cambiar, sobre todo cuando el estudio a realizar abarca periodos amplios de tiempo. Por ejemplo, la curva de oferta del agua proveniente de la desalación de agua de mar, se ha ido desplazando hacia abajo progresivamente como consecuencia de las mejoras tecnológicas conseguidas en dicho procedimiento (membranas osmóticas, etc.).

Conducta de las empresas

Se considera que las empresas actúan para maximizar su beneficio económico, que se obtiene al restar de los ingresos los costos.

Las empresas utilizan varios factores productivos para fabricar bienes y servicios. Los factores productivos básicos son:

- recursos naturales
- trabajo
- capital

Estos factores pueden combinarse de muchas formas para producir determinados bienes y servicios.

Para maximizar su beneficio las empresas deben ser productores eficientes. Esto implica que sean técnicamente y económicamente eficientes⁶. O dicho de otra forma, deben asignar eficientemente los factores productivos.

El rendimiento marginal de cada factor productivo es la producción adicional que se obtiene empleando una unidad adicional de dicho factor.

Los mercados de factores productivos pueden inicialmente considerarse similares a los mercados de bienes y servicios; pero tienen ciertas diferencias importantes:

1. la demanda de los factores productivos es “derivada” de la demanda de productos finales que con ellos se producen: los agricultores no requieren agua porque ellos la necesiten, sino porque les sirve para producir lechugas. Si la gente no desea más lechuga estos agricultores no requerirán más agua.
2. los factores productivos son ofrecidos por las economías domésticas, lo cual influye sobre la distribución de la renta.

La demanda de múltiples factores por parte de las empresas se ajusta de forma que el cociente entre el costo de cada factor productivo y su producto marginal sea constante e igual al ingreso marginal:

$$\frac{C_{rec.nat.}}{PM_{rec.nat.}} = \frac{C_{trabajo}}{PM_{trabajo}} = \frac{C_{capital}}{PM_{capital}} = IM \quad (2.10)$$

La cantidad demandada de un factor responde tanto al precio de dicho factor como al precio del producto producido.

En general, cuanto mayor sea la proporción dentro de los costos totales de un factor productivo, más elástica será su demanda.

⁶Un método productivo es económicamente eficiente si minimiza el costo de oportunidad de los factores productivos.

Corto plazo y largo plazo

Las posibilidades de las empresas para cambiar su proceder depende del tiempo. A corto plazo las empresas sólo pueden modificar la cantidad utilizada de los factores variables, mientras que los factores fijos permanecen constantes. A largo plazo todos los factores son variables.

El tiempo que determina el corto plazo o el largo plazo depende de la industria considerada: en las industrias ligeras el largo plazo puede ser de meses, mientras que en industrias pesadas (con gran inercia) el largo plazo puede ser de varios años.

Costos a corto plazo

La distinción entre costos fijos y variables sólo tiene sentido a corto plazo. Los primeros no dependen de la cantidad producida, mientras que los segundos sí.

El costo total (CT) es la suma de los costos fijos (CF) y los costos variables (CV). El costo medio (Cme) es alguno de los costos anteriores dividido por la producción total.

El costo marginal (CMarg) es el costo de producir una unidad adicional, o sea los costos adicionales de aumentar la producción en una unidad.

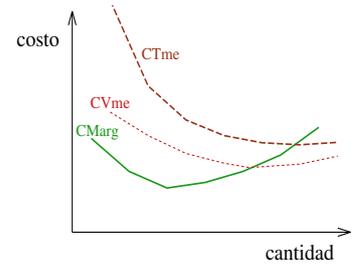


Figura 2.14: Costos medios y costos marginales.

La Figura 2.14 muestra la forma típica de los costos más relevantes.

Rendimientos decrecientes

El producto marginal de un factor de producción variable es la producción adicional que se obtiene al emplear una unidad adicional de dicho factor.

La ley de los rendimientos decrecientes establece que en la producción de todos los bienes en los que intervienen varios factores productivos, si se incrementa el uso de un factor –permaneciendo constantes los restantes factores– el producto marginal de este factor inicialmente aumenta, pero llegado un cierto nivel de uso comienza a disminuir, como muestra la línea continua de la Figura 2.15.

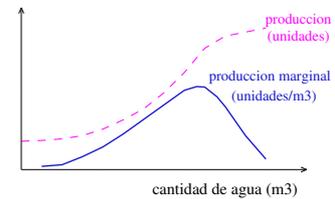


Figura 2.15: Ley de rendimientos decrecientes.

Economías de escala

Las industrias con economías de escala se caracterizan por una curva de costo medio a largo plazo monótonamente decreciente, como muestra la Figura 2.16.

Hay 3 razones por las cuales hay economía de escala:

- la indivisibilidad de la producción.
- la especialización.
- las economías técnicas.

Los servicios relacionados con el agua presentan en general economías de escala, debido a economías técnicas.

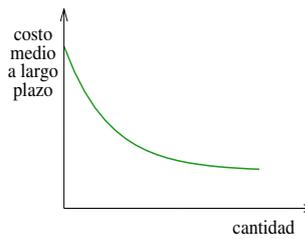


Figura 2.16: Costos en una economía de escala.

Recuperación de costos

Normalmente las empresas públicas que prestan servicios relacionados con el agua fijan sus tarifas en función del costo medio, con el objetivo de recuperar los costos históricos incurridos en la provisión del servicio sin obtener beneficios.

Los economistas insisten en la necesidad de fijar tarifas en función del costo marginal del servicio, ya que sólo en este caso el consumidor estará pagando los costos reales que conlleva la decisión de aumentar o reducir su consumo. Los sistemas tarifarios reales casi siempre fallan en reflejar el costo marginal.

El problema que se presenta es que, como los costos marginales suelen ser decrecientes (Figura 2.16), esto puede acarrear problemas financieros. Para solucionar este problema se ha propuesto la tarifa de doble tramo: aplicar un cargo fijo para recuperar una proporción segura de los costos, y recuperar el resto de los costos con la tarifa que refleje el costo marginal del servicio.

Equilibrio de mercado

En un mercado, el precio de equilibrio (pe) y la cantidad intercambiada (ce) está determinado por la intersección de la curva de oferta y la curva de demanda (Figura 2.17).

Si la cantidad intercambiada no fuera la de equilibrio, tanto los compradores como los vendedores se verían beneficiados al aumentar o disminuir la cantidad intercambiada hasta llegar a dicho punto de equilibrio.

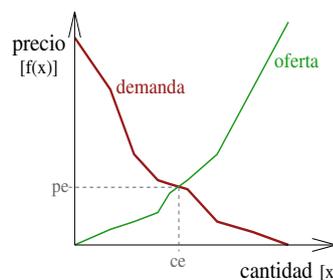


Figura 2.17: Equilibrio de mercado.

El precio transmite la señal de escasez o abundancia entre productores y consumidores. Sin embargo, como se verá en la sección 2.3.2, alcanzar este punto de equilibrio requiere de cierto tiempo.

Excedente de consumidores y excedente de productores

A partir de las condiciones de equilibrio de mercado, puede calcularse cuanto se beneficia el grupo de consumidores y el grupo de los productores.

Puesto que los compradores están dispuestos a pagar por cada unidad de agua lo que indica la curva de demanda, pero pagan sólo el precio de equilibrio, el área sombreada de la Figura 2.18 indica el beneficio que reciben los compradores por comprar el agua a un determinado precio.

Análogamente, la curva de oferta muestra que los productores están dispuestos a vender las unidades producidas a distintos precios, pero como venden a un precio único, el área sombreada de la Figura 2.19 indica el beneficio de este grupo.

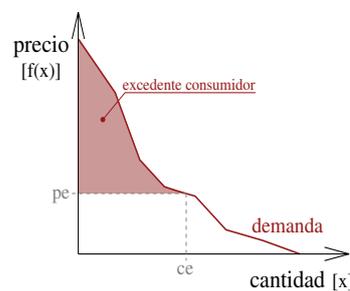


Figura 2.18: Excedente consumidor.

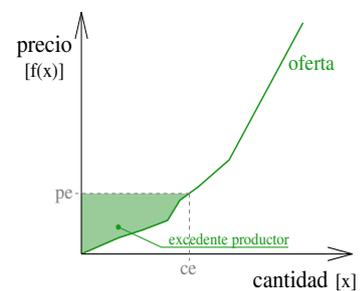


Figura 2.19: Excedente del productor.

Mercado perfectamente competitivo

Un mercado perfectamente competitivo es una abstracción teórica extrema que sirve de referencia para describir los mercados reales. Este mercado teórico tiene las siguientes 5 condiciones:

- vendedores y compradores son pequeños en relación al mercado, con lo cual no puede influir significativamente en la cantidad ofrecida.
- el producto es homogéneo (indistinguible según provenga de un vendedor u otro).
- vendedores y compradores están bien informados de los precios.
- los vendedores actúan independientemente, y también los compradores.
- vendedores y compradores pueden salir y entrar libremente del mercado.

Los mercados que más se acercan a los perfectamente competitivos son los de acciones y los de muchos productos agrícolas.

Sistema de precios y eficiencia

Para los bienes que tienen un mercado perfectamente competitivo, el mecanismo de mercado se encarga de producir una asignación eficiente de los recursos.

Una asignación de recursos es eficiente *en el sentido de Pareto* cuando no es posible mejorar el bienestar de ninguna persona sin perjuicio para alguna otra. En esta situación no hay despilfarro de recursos.

En el punto de equilibrio de un mercado perfectamente competitivo:

$$\text{precio} = \text{valor marginal para los consumidores} = \text{costo marginal de producción}$$

El mercado perfectamente competitivo maximiza el bienestar de los consumidores, para la distribución dada de la renta. Pero atención: el mercado da el mismo trato al dinero de los ricos que de los pobres; de manera que en una economía de mercado los ricos tienen más votos que los pobres al momento de decidir a que usos se destinan los recursos escasos.

La Figura 2.20 representa gráficamente el punto de equilibrio (que en un mercado perfectamente competitivo) es el único punto de asignación eficiente en el sentido de Pareto.

Para la sociedad, el aumento del bienestar está constituido por el aumento del excedente de productores más el aumento del excedente de consumidores. Al aumentar la producción de $c1$ a $c2$, esta suma está representada por el área 1 (gris claro). Al aumentar de $c2$ a ce el aumento de bienestar está representado por el área 2 (gris oscuro).

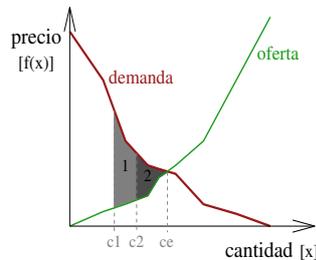


Figura 2.20: Equilibrio de mercado, situación óptima para productores y consumidores.

Cualquier alejamiento del punto de equilibrio empeora la situación tanto de productores y consumidores.

Siempre que se sacrifica la eficiencia económica en el sentido de Pareto, por criterios de justicia o equidad, las ganancias monetarias de los beneficiarios son menores que el costo que tienen para los perjudicados, puesto que no se maximiza el beneficio total, como se verá en la sección 2.3.2.

Como ya se mencionó al comienzo de este capítulo, el concepto de eficiencia no está vinculado al concepto de justicia. El concepto de eficiencia pertenece a la economía positiva, mientras que el de justicia pertenece a la economía normativa.

Efecto de subsidios e impuestos

Los subsidios modifican el punto de equilibrio, aumentando la cantidad intercambiada y disminuyendo el precio. Los impuestos al consumo se comportan al revés de los subsidios. En la Figura 2.21 se representa el efecto del subsidio.

El punto de equilibrio inicial –sin intervención– es $(c_e; p_e)$. Al introducir un subsidio, por el cual se paga una parte del precio del agua, los usuarios sólo pagan p_s . Para ese nivel de precio los usuarios demandan la cantidad c_s , y producir esa cantidad cuesta p_b .

El área sombreada representa el costo que tiene para la sociedad (los ciudadanos) dichos subsidios. Los subsidiados reciben sólo una parte de ese dinero, mientras que hay otra parte que se pierde en sostener esa situación “artificial” (ver apartado 2.3.2).

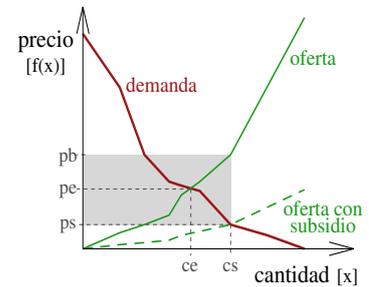


Figura 2.21: Efecto de los subsidios.

Desde el punto de vista de la gestión del agua, tanto los subsidios directos al consumo de agua como los subsidios a los productos derivados del agua (energía, productos agrícolas) provocan aumentos de la demanda, respecto a la demanda que habría sin subsidio.

Para los economistas, el problema de los subsidios es que provocan una asignación ineficiente de los recursos. Como la decisión de subsidiar o no (y la de aplicar o no impuestos) es una decisión política, es muy importante que los encargados de tomar la decisión sepan las repercusiones económicas de la misma.

Suele suceder que los que reciben los subsidios son grupos bien organizados, con bastante capacidad de presión, y la cantidad que recibe cada miembro del grupo es importante. Por el contrario, los que pagan el subsidio son un grupo mucho más amplio (en principio toda la sociedad), y la cantidad de dinero que le cuesta a cada uno no es tan importante como para provocar la organización y la defensa de sus intereses. Esto explica (en parte) por qué se mantienen muchos subsidios.

Tiempo de ajuste del mercado

Otro aspecto importante a considerar es la influencia del tiempo en la respuesta del mercado. Supongamos que se produce un desplazamiento brusco de la oferta como el cambio de O a O' en la Figura 2.22. El punto de equilibrio luego del cambio se encuentra en la intersección de la nueva curva de oferta (O') con la curva de demanda a corto plazo D_{cp} . Conforme pasa el tiempo y los consumidores se adaptan a la nueva situación, la curva de demanda se “elastiza” gradualmente, hasta alcanzar el punto de equilibrio correspondiente a la intersección con la curva de demanda a largo plazo D_{lp} .

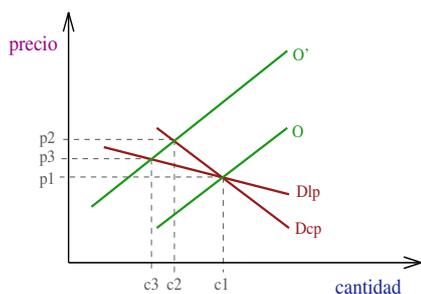


Figura 2.22: Respuesta ante un desplazamiento brusco de la oferta.

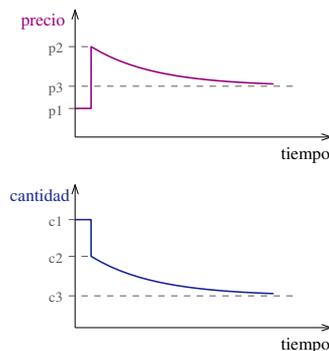


Figura 2.23: Ajuste del mercado frente a un desplazamiento de la oferta.

La Figura 2.23 muestra la respuesta a lo largo del tiempo ante una reducción brusca de la oferta. A corto plazo los compradores no pueden ajustar sus requerimientos, con lo cual el precio sube bruscamente para producir la reasignación. Con el paso del tiempo los compradores tienen capacidad de reaccionar ante esta nueva situación, sustituyendo el bien considerado, con lo cual el precio baja gradualmente hacia el nuevo valor de equilibrio. La cantidad continúa bajando también gradualmente.

Las elasticidades, tanto de la oferta como de la demanda, son mayores a largo plazo porque evidentemente los agentes económicos pueden adaptar completamente su comportamiento a las condiciones actuales, cosa que la inercia y la falta de tiempo les impide conseguir en el corto plazo.

Respuestas del mercado a las tres preguntas básicas

Recapitulando lo dicho en las secciones anteriores, podemos decir que el libre mercado responde a las tres preguntas básicas de la economía de la siguiente forma:

- *que* bienes producir: lo deciden los compradores, intentando maximizar su utilidad
- *cómo* producirlos: lo deciden los vendedores, intentando maximizar su beneficio
- *para quién*: para quien pueda y quiera pagar el precio de los bienes

Fallos de los mercados

El sistema de mercado en la práctica suele presentar fallos. Cuando estos se producen, el precio no refleja el costo marginal de producir los bienes o no refleja el valor marginal que tiene para los consumidores, y la asignación de recursos deja de ser eficiente. Los fallos del mercado son una de las razones por las cuales el Estado interviene activamente en la economía. Los fallos más corrientes son:

- **Formación de un monopolio:** en el caso de que haya un único (o muy pocos) productores, estos pueden ponerse de acuerdo y restringir la producción para aumentar sus beneficios, perjudicando al resto de la sociedad. Los servicios relacionados con el agua presentan costos decrecientes o economías de escala, por lo que la producción de los mismos tiende al monopolio natural. Cuando la Administración (el Estado) es el prestador del servicio, aunque sea el único proveedor, si no hace uso de su poder de monopolio para restringir la producción, no provoca asignación ineficiente de los recursos.
- **Externalidades:** cuando una actividad impone efectos no compensados a terceros (que no son el productor ni el consumidor), o sea que hay efectos que no se reflejan en el precio. El caso típico es la contaminación; y el tratamiento clásico es intentar internalizar estos costos dentro del precio. No todas las externalidades son negativas.
- **Información imperfecta:** a veces los usuarios no son conscientes de los beneficios o perjuicios que implican ciertas acciones que sí son correctamente valoradas por expertos, como por ejemplo los beneficios de conservación de especies salvajes y la biodiversidad. También puede suceder que no todos los intervinientes en el mercado dispongan de igual acceso a la información, con lo cual no pueden ajustar eficientemente sus conductas.
- **Bienes públicos o bienes colectivos:** estos bienes pueden ser usados por muchas personas sin menoscabo de su utilidad, como el bien de un entorno saludable, una vista bonita o un cierto grado de protección frente a inundaciones. Es muy difícil o muy costoso excluir a los que no quieren pagarlos. La solución usual es que estos bienes públicos sean pagados por la sociedad, y que sea ésta (a través de sus representantes) quien decida cuales y cuántos de esos bienes desea.
- **Distribución sesgada del poder:** el funcionamiento puro del mercado tiende a concentrar mucho poder en pocas manos, situación que suele ser perjudicial para el funcionamiento armonioso del tejido social.

La sociedad puede modificar o rechazar mediante un proceso político las soluciones de libre mercado. En la teoría de mercado, la distribución actual de la renta se considera dada. Como en el juego del mercado 1 euro = 1 voto, los ricos votan más, o tienen más influencia que los pobres. La intervención del Estado se basa en los 6 fallos reconocidos al mercado. La curva de demanda captura el comportamiento de los consumidores, cuando se mantienen inalterados los factores subyacentes de la demanda.

La intervención del Estado

En todas las naciones el Estado interviene en mayor o menor medida. Interviene para regular el poder de monopolio, minimizando los efectos perjudiciales de éste. También interviene en la producción de múltiples bienes y servicios públicos como la seguridad o la protección del medio ambiente; y en la fijación de impuestos y subsidios.

La demanda de bienes públicos

Los bienes públicos son aquellos que puede ser consumidos por muchas personas sin perder sus propiedades, como por ejemplo un bonito paisaje.

Los bienes públicos se caracterizan por tener un costo de exclusión muy alto: es muy difícil (o imposible) impedir a quienes no paguen disfrutar del mismo. Por esta razón la decisión acerca de la cantidad de bienes públicos a producir se toma mediante un proceso político, y sus costos son asumidos por el conjunto de la sociedad.

La obtención de la curva de demanda de mercado para un bien público es distinta a la de un bien privado: en este caso las curvas individuales se suman en vertical, tal como muestra la Figura 2.24, puesto que una determinada cantidad del bien en cuestión puede ser disfrutada simultáneamente por muchas personas.

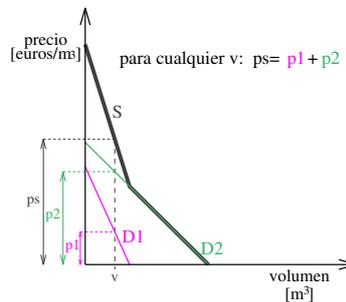


Figura 2.24: Suma de curvas de demanda de un bien público.

2.3.3. Evaluación de proyectos

Las grandes decisiones en materia de gestión del agua suelen ser decisiones públicas que se toman (casi siempre) teniendo en cuenta múltiples objetivos, y por lo tanto el proceso de evaluación debe contemplar esta perspectiva más amplia.

En esta perspectiva, la evaluación económica calcula el valor presente de los beneficios netos de las distintas alternativas, de acuerdo a las reglas del arte. La alternativa obvia, pero que ha de evaluarse, es no emprender ningún proyecto de los propuestos. Posteriormente los resultados económicos, junto con los resultados sociales y ambientales de cada proyecto son balanceados por los tomadores de decisiones para elegir una alternativa.

Dentro del estudio económico es también altamente deseable que se incluyan evaluaciones de cómo afectan los efectos beneficiosos y perjudiciales a distintos grupos sociales: por grupos de renta, por divisiones políticas, por regiones, por sexos, por sectores de usuarios, etc., ya que esta información es fundamental para estudiar el efecto social de los proyectos.

Análisis Costo-Beneficio

El análisis Costo-Beneficio (ACB) es la forma práctica de testar la mejora de la eficiencia de un proyecto en el sentido de Pareto.

El mecanismo fundamental para este análisis es la actualización de los flujos monetarios que se producirán en el tiempo, como se explica en la siguiente sección.

Una detallada explicación de este procedimiento puede encontrarse en el excelente libro de [James y Lee, 1971].

Un serio inconveniente del método (que comparte con los mecanismos de mercado), es que trata a todos los individuos involucrados con igualdad, y por ello consiente en empobrecer a los pobres al mismo tiempo que se enriquecen los ricos. O sea que trata un aspecto de eficiencia y no de justicia (economía normativa). Otra crítica proviene de la visión antropocéntrica de este método, que no le reconoce al ambiente y al resto de los seres vivos un valor intrínseco.

También, muchos autores señalan las dificultades en la aplicación de este método, entre otros motivos por la dificultad de estimar los beneficios secundarios (o indirectos) y los beneficios intangibles [Hanke y Walker, 1974, Arrow et al., 1996], o por disponer de pocos datos para la aplicación rigurosa de este procedimiento [Palinisami y Easter, 1984].

Actualización

Cuando los beneficios y/o los costos se producen a lo largo del tiempo, hay que actualizar los valores futuros para hacerlos comparables con los actuales.

Si bien la necesidad de actualizar es cuestionada desde el punto de vista ético por varios autores, hay dos razones principales que justifican la existencia de dicha actualización en la evaluación de un proyecto:

- la preferencia en el tiempo: casi todo el mundo prefiere recibir 1.000 € hoy que el año próximo. Esto se debe a la impaciencia de las personas y a la incertidumbre asociada a acontecimientos futuros.
- la productividad del capital: hay un costo de oportunidad perdido en tener el dinero en el futuro con respecto a tener esa misma cantidad hoy, ya que el dinero es un bien productivo del que puede conseguirse un rendimiento positivo.

El valor actual (VA) o valor presente de una corriente de pagos que se producirá en el futuro es el valor que habría que invertir hoy para hacer frente al vencimiento de esos pagos. El valor actual de un pago P producido dentro de k años se calcula con la siguiente fórmula:

$$VA_k = \frac{P}{(1+i)^k} \quad (2.11)$$

Donde: - k cantidad de años.
- i tasa de descuento anual.

Para comparar distintas opciones se calcula el valor presente de cada una de ellas, aplicando una tasa de descuento al flujo de costos y beneficios, durante la vida útil de las instalaciones o el periodo de análisis.

Es necesario hacer una aclaración importante: la actualización es un proceso completamente separado del ajuste por inflación. Los cálculos de actualización se hacen en

moneda constante, luego de ajustar el poder de compra del dinero mediante la corrección de los efectos de la inflación [Edwards-Jones et al., 2000].

La tasa de descuento i indica la preferencia de los consumos actuales sobre los consumos futuros. La complejidad de establecer una tasa de descuento no se pretende abordar en este trabajo; sino solamente destacar que en los proyectos públicos —como suelen ser los relacionados con el agua— se debe emplear una tasa de descuento “social”, menor a la que emplean las empresas en sus negocios particulares, ya que los criterios de la sociedad son distintos: el plazo de análisis es mucho mayor, puede ser deseable reducir el consumo hoy en aras del bienestar de las generaciones futuras, etc.; cuestiones que una empresa privada no tiene en cuenta.

Ajuste por inflación

La tasa de inflación es la tasa de crecimiento del nivel medio de precios expresado en forma porcentual a lo largo de un año. Para ello los gobiernos definen una canasta de bienes y servicios, cada uno de los cuales incide en cierta proporción en el nivel o índice de precios.

El precio relativo de un bien o servicio, en relación a otro, es igual al cociente de sus respectivos precios. Expresa cuantas unidades del bien A se necesitan para comprar una unidad del bien B. Esta forma de expresión de los precios permite establecer, corregir automáticamente el efecto de la inflación y comparar valores de bienes en fechas distintas.

Otra forma es usar el precio real de bienes y servicios, que es el precio del bien vinculado al nivel general de precios. Para esto hay que tomar una fecha como referencia. Por ejemplo: el precio del suministro urbano de agua en el año 2003 se expresa en x euros del año 2000. Así pueden hacerse comparaciones intertemporales consistentes.

Eficiencia financiera vs. eficiencia económica

La *eficiencia financiera* tiene en cuenta los retornos de las inversiones de capital, y para esto considera únicamente las actividades en las cuales hay un intercambio de dinero. Estas cuestiones son las que interesan habitualmente a una empresa privada en su búsqueda de ganancias.

La *eficiencia económica* tiene en cuenta el bienestar de la sociedad, y por ello debe valorar también las actividades que no llevan aparejado un intercambio de dinero, pero que tienen valor. La eficiencia económica es preocupación de los gobiernos y de las administraciones que trabajan en beneficio colectivo. En este análisis se debe incorporar también el uso del agua como bien público y/o bien sin mercado.

Por ejemplo: la mejora en la calidad de un cuerpo de agua puede ser muy eficiente económicamente, y aún así tener una eficiencia financiera pobre para la administración que emprende la tarea de restauración.

En una cuenca o sistema de recursos hídricos, la eficiencia económica es máxima cuando la suma de los beneficios en todos los usos menos los costos (para hacer posibles aquellos) alcanza el mayor valor posible.

2.3.4. Inclusión de la visión ambiental en la economía

Desde la década de los 70, con los grandes problemas ambientales, surgieron voces que abogaban por cambiar la visión tradicional del ciclo económico, incorporando la componente ambiental en las relaciones productivas de la economía [Pearce y Turner, 1990].

La Figura 2.25 muestra la visión tradicional o convencional del ciclo económico, en que este se considera aislado o separado del medio ambiente.

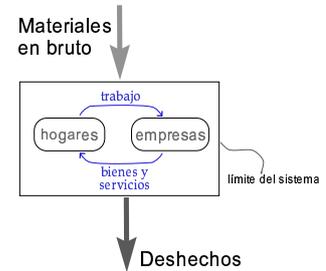


Figura 2.25: Visión tradicional del ciclo económico.

Esta visión sería correcta si el ambiente tuviese capacidad ilimitada de proveer materiales y absorber desechos.

La Figura 2.26, en cambio, muestra una visión más amplia del ciclo económico, en la que éste está integrado dentro del medio ambiente, y no fuera como antes.

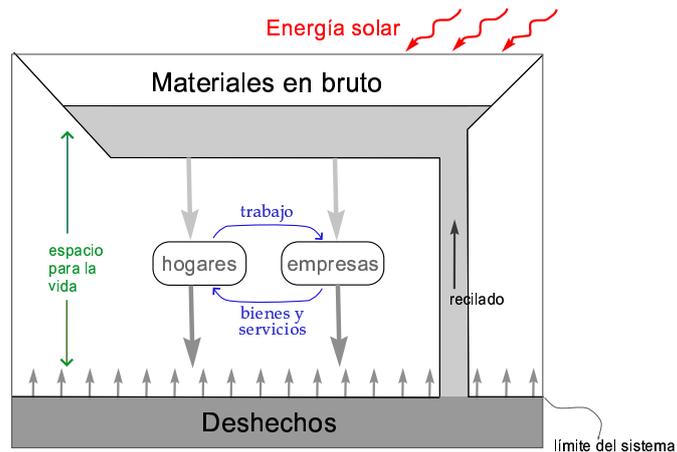


Figura 2.26: Visión sostenible del ciclo económico.

Esta nueva visión tiene una diferencia sustancial con la visión anterior: sugiere que los impactos sobre el *espacio para la vida* (o medio ambiente) deben mantenerse dentro de ciertos límites que hagan posible la continuación de la vida; ya que la humanidad ha de convivir con los efectos que sobre el medio ambiente genera su comportamiento.

El problema está en que esos límites antes mencionados son imprecisos. Para estos casos, [Edwards-Jones et al., 2000] menciona dos criterios que deben guiar el comportamiento:

- precaución frente a la incertidumbre: respecto a la cantidad total de los recursos, a la capacidad de reciclado, etc. Esto hace deseable una buena dosis de precaución en el manejo de los recursos naturales.
- conveniencia de mantener lo más alto posible el “stock de capital” de la humanidad, dentro de los que se incluyen los recursos naturales. El capital se puede dividir en 3 componentes: capital natural, capital humano y capital antrópico.
Un desarrollo fuertemente sustentable desde el punto de vista ambiental es el que mantiene constante la componente de capital natural entre generaciones sucesivas.

2.4. Modelos económicos antecedentes

La maximización de los beneficios económicos relacionados con el uso del agua ha sido objeto de innumerables estudios desde hace largo tiempo. Estos estudios en general centran su atención en un uso determinado del agua, o en un SRH o cuenca concreta. Esta abundante literatura, se puede agrupar en distintas categorías en función de la subárea en la que ponen énfasis:

- La subárea de optimización de SRH con fines hidroeléctricos fue el campo pionero en la realización de estudios económicos, donde se encuentran muchos trabajos, como por ejemplo:
 - [Scott y Read, 1997] determina la operación óptima de un sistema de embalses que generan energía complementados por centrales térmicas, mediante programación dinámica dual. Una característica a destacar es que el sector eléctrico funciona efectivamente como un mercado con ciertas regulaciones, lo que permite conocer la curva de demanda de la energía, determinando a partir de ésta el valor marginal del agua con fines energéticos.
 - [Martin, 1983] usa un modelo de maximización del beneficio económico obtenido de la producción de energía hidroeléctrica para optimizar el funcionamiento del sistema del Bajo Colorado (EE.UU) a escala horaria.
 - [Barros et al., 2003] optimiza un sistema complejo de 75 embalses con fines hidroeléctricos en Brasil, empleando programación lineal y no lineal.
- En la subárea de aguas subterráneas, [Crocker y Forster, 1992] valoran los beneficios económicos obtenidos al prevenir la contaminación de acuíferos, abordando la inter-temporalidad de la contaminación y los efectos derivados, la cantidad de población expuesta y la percepción del riesgo; abogando por el principio de precaución en la gestión de los acuíferos.
- En la subárea de uso conjunto (superficial-subterráneo):
 - [Matsukawa et al., 1992] emplea para la cuenca del río Mad (California) un modelo de programación no lineal usando MINOS, y considerando el acuífero con un modelo distribuido.
 - [Pulido Velázquez, 2003] también realiza un modelo no lineal en GAMS para una cuenca simple, modelando el acuífero de forma distribuida, con la técnica de los autovalores [Andreu, 1984].
 - [Faisal et al., 1994] utilizan un modelo de programación no lineal para optimizar las decisiones en la gestión de un acuífero complejo, modelado mediante funciones de kernel discretas.
 - [Lefkoff y Gorelick, 1990]: usan un modelo económico con mecanismo de mercado para asignar el recurso en un sistema con agua superficial y subterránea, para conseguir mayores beneficios totales.

- En la subárea de gestión de sistemas de irrigación también hay abundante literatura técnica:
 - [Arumugam y Mohan, 1997] presenta un trabajo de gestión óptima de un sistema de irrigación, considerando múltiples áreas de riego y balsas de almacenamiento.
 - [Chakravorty y Roumasset, 1994] realiza un modelo de optimización económica en un sistema de irrigación para determinar la asignación eficiente en las distintas localizaciones del sistema, considerando costos y beneficios.
 - [Lefkoff y Gorelick, 1990] estudia como gestionar óptimamente un acuífero con problemas de salinización.
 - [Bazzani, 2003] presentan un SSD a escala de cuenca, enfocado a resolver problemas relacionados con la irrigación.
 - [Gibbens y Goodman, 2000] presentan una aplicación en entorno SIG del modelo MODSIM, aplicado al estudio de un proyecto de desarrollo de un área de regadío.

2.4.1. Modelos de asignación eficiente

Estos modelos tienen por finalidad específica determinar el reparto económicamente eficiente de agua. Ya no se basan en maximizar el suministro de unos usos ordenados mediante prioridades relativas, como los modelos enumerados en la sección 2.1.3; sino que incorporan para los distintos elementos una función de costo/beneficio o perjuicio, y con ellas asignan el agua de forma que se maximice el beneficio total del SRH.

Hay que decir que existen multitud de modelos desarrollados para optimizar económicamente la gestión de un SRH particular; pero son muy pocos los que realizan dicha optimización en cualquier sistema que se quiera diseñar.

Modelos específicos

Centrando la atención en modelos de asignación a escala de cuenca, numerosos autores utilizan distintas técnicas y algoritmos para resolver los problemas no lineales que de gran tamaño. Los modelos mencionados en esta sección se aplican a una cuenca concreta:

- [Niedda y Sechi, 1996] usa un procedimiento de optimización mixto basado en programación lineal en redes de flujo y un método de sub-gradiente para tratar las no linealidades en problemas de gran tamaño.
- [Sun et al., 1995] utiliza el algoritmo EMNET [McBride, 1985] para resolver una red de flujo generalizada, lo que le permite introducir restricciones adicionales. Estos investigadores han aplicado su modelo al Metropolitan Water District of Southern California encontrando que dicho algoritmo es significativamente más rápido que MINOS.

- [Cai et al., 2001] presenta una metodología holística para la resolución de problemas no-lineales muy grandes (más de 10.000 variables), basado en subdividir el problema inicial en partes. De esta forma consigue resolver esta clase de problemas donde un algoritmo más establecido como GAMS fracasa en encontrar una solución factible.
- [Vaux y Howitt, 1984]: obtiene la maximización de beneficios (excedentes), usando funciones no lineales y mediante el funcionamiento de mecanismos de mercado.
- [Booker y Young, 1994]: desarrolla un modelo en GAMS para maximizar el beneficio neto de las asignaciones de agua en la cuenca del río Colorado (EE.UU.). Modela simultáneamente cantidad de agua y salinidad. Las demandas de riego provienen del uso de un modelo lineal.
- [Characklis et al., 1999]: modelo de optimización económica bajo criterios de mercado, aplicado en la zona inferior del río Grande (EE.UU.).

Modelos generales

Puesto que en esta tesis se presenta un modelo genérico o general de optimización económica a escala de cuenca, se dedica atención especial los pocos modelos antecedentes pertenecientes a esta categoría. Y son los que han servido como referencia para el desarrollo de los programas acá presentados.

Estos antecedentes más cercanos son:

- Aquarius [Díaz y Brown, 1999] es un modelo de asignación de agua entre usos en competencia, bajo criterios de eficiencia económica. Constituye una referencia muy valiosa, principalmente por los conceptos teóricos de la modelación económica expuestos en su segundo capítulo. Este modelo es de paso mensual, y las curvas de demanda de los elementos pueden ser de dos formas: lineal o exponencial. La función objetivo se optimiza mediante un algoritmo de programación cuadrática secuencial. Al intentar usarlo se encontraron problemas en la búsqueda de una solución inicial factible en los casos que no se pueden satisfacer completamente todos los usos (y que son los de más interés práctico).
<http://www.fs.fed.us/rm/value/aquariusdwnld.html> y
<http://www.engr.colostate.edu/depts/ce/research/aquarius/index.html>
- CALVIN [Newlin et al., 2002] [Draper et al., 2003] es un modelo de paso mensual, que modela el sistema mediante una red de flujo generalizada y la resuelve con el algoritmo HEC-PRM [HEC, 1994], maximizando el beneficio neto del sistema. La función objetivo es no lineal, pero se linealiza a tramos para su resolución. Se representan las infraestructuras del sistema con las restricciones de operación, costos operativos de transporte de agua superficial, bombes, costos de distribución, costos de recarga y costos por calidad de agua (salinidad). Este modelo se ha aplicado en California (USA), con una cuidadosa estimación de los parámetros de los usos y su evolución futura.

2.5. Recapitulación de los antecedentes recopilados

Recapitulando, lo visto a lo largo de este capítulo, puede resumirse en los siguientes puntos:

- Los modelos de simulación y optimización “clásicos” o no económicos son herramientas muy empleadas por las agencias del agua de todo el mundo para planificar y gestionar el uso y conservación del recurso hídrico. Estos modelos se están ampliando en diversas direcciones, una de las cuales es la incorporación de los aspectos económicos.
- Los modelos basados en redes de flujo constituyen un grupo especialmente nutrido y consolidado de los modelos anteriores, especialmente necesarios para atacar problemas de gran tamaño. Las diferencias entre ellos se encuentran en la facilidad en que interactúan con el usuario, mientras internamente resultan todos bastante similares.
- Al pretender modelar o representar el rendimiento económico del SRH se hace necesario trabajar con problemas no lineales, bastante más complejos que los problemas lineales, entre otros motivos por la posibilidad de que existan varios mínimos locales.
- El área de la optimización no lineal es un área muy activa de investigación, existiendo distintas estrategias para abordar esta clase de problemas; habiéndose elegido para este desarrollo la optimización de una función objetivo convexa con algoritmos de gradiente (o clásicos), en formato de redes de flujo.
- Que a raíz de la creciente escasez de agua útil, la inclusión de conceptos económicos básicos, en particular el empleo de mercados como forma de gestionar la escasez, puede ser de gran utilidad para la gestión y conservación del agua que hoy se encuentra seriamente amenazado y degradado.
- Pero el mecanismo de mercado necesita de la regulación pública (y consecuentemente de la participación ciudadana) a fin de que sea un instrumento útil para alcanzar objetivos de sostenibilidad, equidad y protección ambiental enunciados en constituciones, leyes y grandes conferencias planetarias. Estos mecanismos pueden ser útiles siempre que uno no se vuelva fundamentalista económico.

Una vez presentados los pilares en los que descansa esta tesis, en los capítulos siguientes se emplearán estos fundamentos en la construcción de los programas informáticos y su aplicación a dos casos reales.

Capítulo 3: Revisión de metodologías de valoración del agua

La estimación del valor económico del agua es un tema muy amplio, por la cantidad de usos posibles de este fluido; y complejo, debido a las peculiares características del líquido elemento. A pesar de estas dificultades, la valoración adecuada es un requisito indispensable para hacer una gestión eficiente del recurso, por lo que a continuación se abordarán ciertos aspectos básicos de este tema.

En la primera parte de esta sección se definen algunos términos que se usan profusamente en el resto de la sección, se realizan algunas clasificaciones útiles, y se repasan las características que hacen del agua un bien especialmente singular desde el punto de vista económico. Estas singularidades explican el porqué de muchos de los problemas que aparecen en las secciones siguientes al intentar valorar del agua.

En segundo lugar se presenta una recopilación de las metodologías o técnicas empleables en la valoración del agua; desde las empleadas en los usos privados del agua, en los que es relativamente más fácil determinar la disposición a pagar, hasta los usos públicos, que requieren técnicas más indirectas de valoración.

Posteriormente se presenta una descripción de las características de los principales usos, y la recopilación de antecedentes de estimaciones del valor del agua en los mismos. Esta última sub-sección constituye el marco de referencia general al momento de enfrentarse a la tarea de valorar en un lugar concreto el empleo de agua cruda en los distintos usos alternativos.

3.1. Generalidades

3.1.1. Definiciones

Es conveniente precisar el alcance de algunos términos [ONU/WWAP, 2003] que se usarán profusamente en el resto de este capítulo y en los capítulos siguientes:

Valor del agua: es una medida monetaria del beneficio que ofrece a ésta a los usuarios. Este valor está asociado a la disposición a pagar para obtener dicho recurso, o la disposición a cobrar por renunciar al uso del recurso.¹

¹El pago para obtener el recurso y el cobro por renunciar a él, en teoría deberían ser iguales; pero las dificultades para predecir los efectos reales de distintas situaciones hace que en la práctica estos valores sean distintos [Brown y Gregory, 1999].

Precio del agua: o también *tarifa* son las cargas que se le cobran a los usuarios o consumidores del recurso. Éste es el aspecto que más influye en la cantidad de agua empleada y en el comportamiento de los usuarios.

Coste (de abastecimiento o suministro) del agua: son los costos de inversión, operativos, de reposición, etc. incurridos en la detección, el tratamiento y el transporte del agua hasta el punto de consumo, y en la deposición final en el ciclo hidrológico natural. El etc. se ha puesto *ex-profeso* para indicar que hay costos que en rigor deberían incluirse, como el costo de oportunidad, el costo de uso o los costos externos; aunque normalmente no se consideran.

Aunque parezca elemental y deseable, no siempre el precio del agua refleja el costo, ni el valor está relacionado con el precio. Las tendencias actuales en la gestión del agua intentan lograr una convergencia de los valores anteriores, mediante el reconocimiento del valor del agua. Por ejemplo, la recuperación total de los costos² en los servicios relacionados con el agua contemplada en la DMA [UE, 2000] pretende que en un futuro próximo el precio refleje el coste.

En la planificación hidrológica tradicional, comúnmente se emplea la palabra *demanda* para designar el volumen de agua requerido para un uso, con la asunción implícita de que el precio actual es nulo³, ya que no se realizan consideraciones económicas. Ese volumen es un objetivo a cubrir, y si durante algún periodo no se puede suministrar se dice que hay fallos o déficit. Este es también el sentido que se le da a dicha palabra en los modelos SimGes y OptiGes de Aqatool.

Al realizar consideraciones económicas hay que “rescatar” el sentido económico de la palabra *demanda*, que es la cantidad de agua que un usuario estaría dispuesto a adquirir a cierto precio⁴. Lo que en la planificación tradicional era un valor único y definido a priori de suministro, en la visión económica es una función que tiene libertad para variar en un rango, dependiendo de la capacidad de pago del usuario. Ahora, al no haber un valor fijo a satisfacer (la antigua demanda), ya no tiene sentido los términos déficit y fallo. En una situación de mercado el usuario tendrá más o menos agua según su disposición a pagar y a las condiciones de la oferta del recurso.

Para evitar confusiones, al elemento de un esquema de SimGes u OptiGes antes llamado demanda, a partir de ahora lo denominamos uso. Y al volumen mensual de cada uso lo denominamos requerimiento mensual o volumen objetivo (para más claridad véase la sección H).

²La recuperación total de los costes (o costos) aboga por que los usuarios paguen el coste total de la obtención, distribución, recogida y tratamiento de las aguas, aunque todavía no hay acuerdo unánime acerca los items que se deberían incluir estos costes.

³Para la gran mayoría de los casos [García Mollá, 2000], el precio actualmente pagado es bajísimo, por lo que puede considerarse que ese volumen corresponde a precio nulo.

⁴La cantidad demandada depende de varios factores (sección 2.3.2), pero por simplicidad normalmente se asume que el precio es el único factor que influye en la cantidad demandada, y esto se representa mediante la curva de demanda (Figura 2.7)

3.1.2. Características singulares del agua

El agua es un bien especialmente singular [Young, 1996b]; las características físicas, económicas y sociales que se describen a continuación, determinan que el agua sea un claro exponente de los bienes sin mercado.

- Suministro del agua (características físicas e hidrológicas):
 - Movilidad: el agua tiende a fluir, evaporarse y/o filtrarse al moverse en el ciclo hidrológico. Esto dificulta la medición del recurso, y hace que tenga un alto costo de exclusión. Los derechos de propiedad (exclusivos), que son la base para los mercados (o intercambios económicos), son relativamente difíciles y caros de establecer y de hacer cumplir.
 - Incertidumbre en el suministro: la precipitación es variables e impredecible en el tiempo y en el espacio. La disponibilidad cambia con las estaciones del año, y los cambios climáticos globales (los cambios naturales más los provocadas por el hombre) agregan incertidumbre a la disponibilidad. Los problemas para la humanidad se encuentran en los extremos de la probabilidad de distribución de suministro: con mucha agua o con muy poca (inundaciones o sequías).
 - Propiedades solventes: el agua es un solvente de muchas sustancias, y esto la hace adecuada para absorber desechos y contaminantes, para diluirlos, degradarlos y/o transportarlos a otros lugares. La capacidad asimilativa del sistema hidrológico es un activo público (o colectivo) limitado y escaso.
 - Interdependencia entre los usuarios: hay un alto grado de relación entre los usuarios de agua de una misma cuenca o acuífero, en particular de los aguas abajo, porque el agua usada rara vez es consumida completamente (por ejemplo evaporada), sino que los usos implican un flujo de retorno —con un deterioro de calidad— a un acuífero o a un cauce. Los usuarios de aguas abajo se ven muy afectados por la cantidad, calidad, los momentos de las sueltas, y los retornos de los usuarios de aguas arriba. Estas interdependencias conllevan externalidades (efectos no compensados de las actividades individuales, véase en la sección 2.3.2), de forma que los productores o consumidores individuales no tienen en cuenta al momento de realizar sus decisiones la totalidad de los costos, y en consecuencia se obtiene un resultado subóptimo para la sociedad.
 - Especificidad local de los problemas y las soluciones: por las variaciones en las aportaciones hidrológicas, por el comportamiento de la demanda, los problemas de recursos hídricos son bastante específicos del lugar. Los problemas de calidad dependen en gran medida del tamaño de la población, de la actividad predominante y del nivel de desarrollo económico. Esto implica que los problemas en gestión del agua tienden a ser específicos del área o la zona, y la política ha de adaptarse a las condiciones locales.
 - Economías de escala: la captación, almacenamiento y distribución de agua —especialmente del agua superficial— muestra economías de escala (costos unitarios decrecientes), por lo que la forma más eficiente de organización es una única empresa (monopolio natural). En consecuencia, la regulación

o la propiedad pública es frecuentemente invocada para evitar precios monopolísticos. Por el contrario, con el agua subterránea se presenta una situación diferente, porque situaciones económicamente eficientes se alcanzan con muchas extracciones relativamente pequeñas, ya que el acuífero sirve de sistema de distribución o transporte.

- Peculiaridades del agua subterránea: los acuíferos son una importante fuente de agua, pero con diferencias importantes respecto de otras fuentes, en particular una tasa de flujo más lenta y mayores dificultades para conocer sus características, rendimiento y calidad.
- Demanda del agua:
 - Variedad de usos del uso del agua: la humanidad obtiene múltiples tipos de beneficios: como *bien de uso* para beber, cocinar, y para saneamiento, como insumo de las actividades productivas en cultivos, comercios e industrias; como *depósito de desechos* debido a su capacidad asimilativa, en el sentido que pueden acarrear desechos, diluirlos, y para algunas sustancias, ayudar en el proceso de transformarlas a formas menos perjudiciales; como elemento para *recreación, aspectos estéticos*; y como hábitat de peces y vida silvestre, aumentar la renta y el tiempo de ocio, la recreación relacionada con el agua crece en importancia y contribuye al turismo.
 - El agua es un bien de bajo valor por unidad de volumen: los costos de capital y energía para transportarla, elevarla y almacenarla suelen ser un porcentaje elevado del valor en el punto de uso. Esto hace que las tecnologías e iniciativas de gestión para la conservación se implementen sólo donde ésta es reconocida como escasa y valiosa.
 - Variabilidad en la demanda: las necesidades de la agricultura oscilan con la temperatura y las lluvias, los usos urbanos también varían a lo largo del día, de la semana y de las estaciones. Tanto los sistemas de distribución como los de almacenamiento y los mecanismos de gestión deben prepararse para satisfacer los picos de demanda.
- Actitudes sociales hacia el agua:
 - Preferencia por la gestión pública: debido a que es esencial para la vida, y para la salud, generalmente se gestiona el agua mediante mecanismos de regulación pública; aunque sólo se requiera para estos fines una cantidad muy pequeña.
 - Conflictos con los valores sociales y culturales.
- Consideraciones legales y políticas:
 - Costos de transacción vs. escasez relativa del agua: los costos de transacción para la gestión y asignación de agua tienden a ser relativamente altos respecto al valor de ésta. Donde el agua es relativamente abundante respecto de la demanda, las leyes de aguas tienden a ser simples y sólo rara vez de cumplimiento obligatorio. Donde el agua es escasa, han surgido sistemas de gestión más elaborados. En muchas regiones, sólo ahora las fuentes de agua se vuelven lo suficientemente escasas para requerir sistemas de gestión formales. El

incremento de la escasez del recurso y los avances tecnológicos (que reducen costo de transacción de monitorear y hacer cumplir las regulaciones), alientan las innovaciones en instituciones de reparto y las opciones para economizar un recurso escaso.

- Impacto acumulativo de muchas pequeñas decisiones: en muchos problemas hídricos las acciones individuales de los cada usuario tomado aisladamente pueden tener un impacto despreciable, pero la suma de muchos usuarios sí que tiene gran importancia. Los casos típicos son los bombeos de un acuífero o la contaminación no puntual agrícola. En estos casos es sumamente necesaria, aunque difícil, una regulación pública efectiva para los numerosos y dispersos tomadores de pequeñas decisiones individuales.
- Aspecto de patrimonio comunitario: como otros recursos naturales móviles (bancos de peces o las aves migratorias) la visión comunitaria se manifiesta en la rivalidad (o sustractabilidad) del recurso, y en el alto coste de exclusión de los parásitos. El problema radica en que las decisiones racionales para los individuos acerca del uso del recurso llevan a un estado no-óptimo considerando al conjunto de los explotadores como un grupo. Los esquemas de acceso abierto (captura del recurso) conduce a una muy rápida y/o excesiva explotación o degradación.

3.1.3. Clasificación de los usos del agua

La humanidad obtiene múltiples beneficios del agua, que pueden agruparse en las siguientes siete grandes categorías:

- a) Bien de uso
- b) Valores estéticos y recreativos (públicos o privados)
- c) Beneficios de asimilación de desechos
- d) Beneficios derivados de evitar perjuicios
- e) Valor de no uso

- f) Preservación de especies y del ecosistema
- g) Valores sociales y culturales

Los usos del primer grupo son susceptibles de consideraciones económicas: sobre ellos pueden hacerse hipótesis de asignación, consideraciones de eficiencia, etc. como las que se realizan en esta tesis.

Por el contrario, los usos del último grupo conforman los llamados valores no-económicos, y escapan a las consideraciones y herramientas de análisis propuestas en este trabajo, ya que pertenecen al ámbito de los acuerdos sociales [Young, 1996b].

La aplicación del mecanismo de mercado se fundamenta en la propiedad privada de los bienes [Young, 1996a], pero en casi todas las legislaciones se considera el agua un bien público, en particular en España desde la aprobación de la Ley de Aguas del año 1985. Esto implica que la Administración debería desempeñar un papel activo en un supuesto mercado del agua, en defensa del interés público.

Los usos susceptibles de tratamiento económico varían a lo largo de un continuo desde bienes rivales a bienes no-rivales.

- Un bien o servicio es *rival en consumo*, si su uso por una persona en algún sentido perjudica o impide el uso de ese mismo bien por parte de otros.
Los bienes que son rivales en consumo son factibles de suministrar y asignar por procesos de mercado o cuasi-mercado, y son frecuentemente llamados *bienes privados*.
El agua para uso doméstico es un ejemplo de bien privado.
- Un bien o servicio es *no-rival en consumo*, cuando el uso por una persona no perjudica su disfrute por parte de otras.
Un bien o servicio no-rival tiene asociado un costo de exclusión elevado: es caro (difícil) impedir que alguien que no haya ayudado a pagar los costos de producción use dicho bien: cuando el servicio existe para un usuario, muchos pueden usar de él. El costo de exclusión elevado se suele llamar también *problema del parásito*. Este problema hace que las empresas privadas no encuentren provecho en suministrar bienes no-rivales, y que no sea factible el uso de mercados para la asignación de éstos. Por ello estos bienes son suministrados por la Administración (o el Estado), y normalmente se financian por impuestos generales, más que por tasas específicas. De allí que los bienes no-rivales se llamen frecuentemente *bienes públicos* o *bienes colectivos*.
El uso del agua de un río con fines paisajísticos o estéticos es el típico ejemplo de bien no rival.

Los beneficios como bien de uso corresponden casi siempre a un uso privado del agua. Los usos se suelen clasificar también según el lugar de aprovechamiento en dos grupos:

- *usos fuera del cauce, con pérdidas o consuntivos*: son los que tienen lugar fuera del sistema hidrológico natural, tales como el riego, el abastecimiento urbano, etc. Como sacar el agua del cauce cuesta, siempre se tratará de bienes o servicios privados.
- *usos dentro del cauce, sin pérdidas o no consuntivos*: son los que no requieren retirar el agua del sistema hidrológico natural, tales como la generación de energía hidroeléctrica, el transporte fluvial, etc. Estos usos suelen ser no-rival, aunque cuando requieren cambiar el tiempo de disponibilidad mediante su regulación adquieren aspectos de rivalidad propios de un bien privado.

La obtención de un valor monetario para bienes que no tienen mercado (como el uso ambiental del agua), es un intento de extender los principios de utilitarismo y de libre mercado a la toma de decisiones medioambientales [Edwards-Jones et al., 2000]. Por ello,

las técnicas de valoración intentan compensar esta carencia de mercados, lo que conlleva implícitas algunas asunciones que conviene que tener presentes:

- Los cambios ambientales, si tienen un valor monetario, deben impactar de alguna forma en el bienestar o la utilidad de los individuos.
- El valor de los cambios ambientales para la sociedad es la suma de los valoraciones de los individuos.
- Para ser commensurables los cambios deben traducirse en cantidad de dinero. Bienes ambientales de igual valor pueden intercambiarse sin pérdida de bienestar.

3.1.4. Composición del valor económico total

El valor económico del agua se puede descomponer en una serie de términos que se suman para conseguir el valor total. [Azqueta y Ferreiro, 1994]

$$\begin{array}{r} \text{valor de uso} \\ + \text{valor de opción} \\ + \text{valor de existencia} \\ \hline \text{valor total} \end{array}$$

- El valor de uso se puede considerar compuesto del valor de uso directo y el valor de uso indirecto.
 - valor de uso directo, como por ejemplo el agua usada en abastecimiento, que implica un consumo de agua. Es la parte del valor que más fácilmente puede reflejarse en un mercado, ya que hay un beneficiario fácilmente identificable.
 - valor de uso indirecto, como por ejemplo el agua con uso paisajístico, que tiene efectos más amplios en el ecosistema o la sociedad. Suelen estar asociados a usos no-consuntivos, y bienes o servicios no valorados en un mercado.
- valor de opción es el valor de reservar un bien para usarlo en el futuro, como el agua de no renovable. Este ítem debe considerarse especialmente en el caso de agua subterránea, para prevenir su sobreexplotación.
- valor de existencia: es el valor que no implica un contacto entre el consumidor y el bien, y que no depende del uso real o potencial que se le dé, sino que está asociado al conocimiento de la existencia del bien, como sucede por ejemplo con la biodiversidad. A su vez se suele descomponer en dos términos: valor intrínseco y valor de herencia.

El valor intrínseco es el asignado por la mera existencia, no en función del uso que hagan los seres humanos del mismo.

El valor de herencia es el que le otorgan personas comprometidas con sus semejantes al hecho de legar a sus coetáneos y a las generaciones futuras bienes valiosos (por ejemplo un ambiente limpio).

3.1.5. Estimación del valor del agua

Las situaciones en las que hay que estimar costos y beneficios del agua en diferentes usos caen en alguna de las cuatro categorías siguientes [Loucks et al., 1981]:

1. Situaciones en las que existen precios de mercado y estos reflejan el valor marginal social del uso del recurso, por ejemplo para los productos agrícolas cuando hay mercados competitivos sin subsidios.
2. Situaciones en las cuales existen precios de mercado pero por distintos motivos éstos no reflejan el valor marginal social del uso del recurso, por ejemplo para los productos agrícolas cuando hay subsidios o cuando el precio no incluye las externalidades de la actividad.
3. Situaciones en las que no existe un mercado, pero que es posible inferir la disposición a pagar de los usuarios si el mercado existiera, como por ejemplo en los usos recreativos.
4. Situaciones en las cuales no es posible simular o inferir el comportamiento de un supuesto mercado, como por ejemplo el valor histórico o sentimental.

Las situaciones más comunes de encontrar en la práctica son la 2 y la 3.

Por otra parte, en el proceso de valoración se deben tener en cuenta las siguientes especificaciones:

- si el agua es un bien final o intermedio.
- diferenciar entre valoración a corto plazo o a largo plazo (considerando o no los costos fijos).

Siguiendo a [Azqueta y Ferreiro, 1994], los aspectos más importantes a tener en cuenta en la valoración del agua son:

- la cantidad: es el aspecto central de la valoración, pero debe contener la influencia de los otros factores.
- la calidad: considerando los requisitos de calidad para los usos, y la calidad del agua luego del uso.
- la pauta temporal: los usos y la oferta tienen un comportamiento estacional.
- el plazo de análisis: la valoración es muy distinta si se analiza a corto plazo o a largo plazo.
- la distribución espacial: la reserva en un lugar y los usos en otro.

3.2. Técnicas de valoración

La clasificación de las técnicas de valoración que se muestra en el Cuadro 3.1 está tomada del interesante libro de [Edwards-Jones et al., 2000].

basado en	Grupo			
	mercados convencionales	mercados implícitos	mercados contruidos	métodos no-económicos
comportamiento actual	cambio de productividad	método del costo del viaje	mercados artificiales	
	costo de oportunidad	salario diferencial		
	dosis-respuesta	valor hedónico		
	costo de restauración			
comportamiento potencial	proyectos sombra		valor contingente	
	costos sustitutos			
otros	costo-efectividad			análisis multicriterio
				técnicas Delphi
				econometría
				evaluación de impacto ambient.
				programación matemática

Cuadro 3.1: Clasificación de las técnicas de valoración.

Las técnicas de valoración normalmente son distintas según el agua sea un bien final o bien intermedio. El agua como bien final o de consumo se emplea directamente para satisfacer necesidades humanas; mientras que el agua como bien intermedio o insumo se emplea para la fabricación u obtención de otros bienes que serán los que finalmente se consumen. En el primer caso las técnicas se basan en la teoría de la satisfacción individual, mientras que para el segundo enfoque se usan técnicas basadas en la maximización de los beneficios de los productores.

3.2.1. Métodos basados en mercados convencionales

Técnica del residuo o del desglose presupuestario

La técnica del análisis residual emplea modelos de maximización del beneficio empresarial. La forma más elemental es emplear la aproximación del balance. La técnica del **balance o desglose presupuestario** consiste en restar de los ingresos todos los costos previsibles de los insumos, excepto del agua, incluido el beneficio empresarial. El remanente o beneficio residual es entonces considerado como el valor del agua empleada [Gibbons, 1986, Young, 1996a].

Los aspectos débiles de esta técnica son:

- las regulaciones distorsionan los precios de mercado, tanto de insumos (trabajo, o electricidad) como de productos (subsídios agrícolas), deben corregirse, para utilizar el valor “social” de estos ítems.
- la variabilidad e incertidumbre de algunos factores a restar, como el beneficio empresarial “razonable” (que dependerá de la dedicación, habilidad, etc. del empresario-agricultor); o el riesgo de pérdida de la cosecha, etc.
- la reticencia por parte de los empresarios de ceder su información empresarial para realizar esta clase de análisis.

Esta técnica tiende a sobreestimar el valor del agua, porque cualquier insumo que se omita o se desprecie termina dejando un residuo mayor. Sin embargo, aplicada cuidadosamente, comparando conjuntos de datos de periodos normales y en sequía, u otras comparaciones de datos escogidos puede arrojar resultados útiles.

Cambio de productividad

El cambio de productividad (o función de producción) es una de las técnicas más empleadas, sobre todo para determinar el valor del agua para uso agrícola. Consiste en:

- estimar el cambio de producción para distintas cantidades de agua aplicada.
- valorar económicamente el cambio de producción anterior mediante el precio de mercado de los productos agrícolas.

Los cambios de producción para distintos valores de agua aplicada se expresan en las “funciones de producción” de los distintos cultivos, obtenidas para unas condiciones determinadas de los restantes parámetros que intervienen en la productividad, mediante estudios agronómicos. Algunas funciones de producción pueden consultarse en [Dinar y Letey, 1996].

La principal dificultad radica en poder aislar el efecto del agua del resto de factores que influyen en la producción agrícola, como la tierra, el fertilizante, o la dedicación del agricultor. Otra dificultad se encuentra en que a veces por distorsiones del mercado, el precio no refleja el valor social (o verdadero) de los productos, y éste último es complicado de obtener.

Como hay costos que por simplicidad se desprecian o se omiten, generalmente esta técnica arroja valores más elevados de los reales para el agua.

Costo de oportunidad

Consiste en valorar el agua en función de los usos alternativos de la misma (ver sección 2.3.1). Por ejemplo valorar los bienes sin mercado, como la preservación del

medio ambiente, mediante los beneficios perdidos al no usar ese recurso en otros usos consuntivos. Así se obtiene al menos una cota inferior del valor del recurso. Se puede usar para valorar la preservación de hábitats, o lugares con especial valor cultural o histórico [Krutilla y Fisher, 1985].

Dosis-respuesta

Este método es idéntico a la función de producción, sólo que en vez de aplicado a una actividad productiva, se aplica a los efectos de la contaminación en la salud, los seres vivos, etc. También se ha usado para estimar el valor de la capacidad de laminar crecidas (defensa frente a inundaciones). Consiste en obtener una función que vincule la causa contaminante con los efectos perniciosos, y luego valorar éstos. Esta técnica es empleada típicamente para determinar las pérdidas por enfermedades hídricas, o las pérdidas por el tabaco. Como sólo se computan los perjuicios directos, se obtiene una cota inferior del valor.

Método de los gastos defensivos

Las comunidades suelen gastar dinero para prevenir o eliminar efectos adversos de los impactos ambientales. Por ejemplo se gasta dinero en eliminar contaminantes del agua potable. Este gasto constituye un valor mínimo de la pérdida de calidad que sufre el agua, y que la comunidad estaría dispuesta a pagar para evitar dicho deterioro.

La ventaja de este método es que los gastos (o costes) defensivos son relativamente fáciles de estimar, y de ahí la utilidad del método. Algunos de los problemas que presenta son que los individuos pueden ser propensos a una excesiva protección, y que la disposición a protegerse depende de su capacidad de pago. Por estas y otras razones el valor suele resultar excesivamente alto.

Costo de restauración

Este método a veces se considera una categoría extrema del método anterior, ya que consiste en determinar el gasto de restaurar el medio al estado previo no perturbado. Por ejemplo, para valorar la pérdida de calidad del agua por contaminación se puede estimar el costo de eliminar los vertidos, aunque usualmente esto suele resultar demasiado desfavorable a los fines prácticos.

Proyectos sombra

El proyecto sombra es otro proyecto que permite conseguir los mismos efectos positivos del proyecto estudiado. El costo del proyecto sombra o alternativo es utilizado para valorar el bien. Si existieran varios proyectos alternativos se elegiría el menos costoso de ellos.

Costo de la fuente alternativa

Esta técnica valora el bien de acuerdo al costo de los sustitutos disponibles. Por ejemplo el agua usada para producir hidroelectricidad puede ser valorada a partir del costo de producir energía mediante centrales térmicas usando combustibles fósiles; las piscinas pueden considerarse sustitutos de un lago en el que no se puede tomar el baño. Esta aproximación es válida si el sustituto cumple exactamente la misma función que el bien original: el sustituto es la fuente alternativa de menor costo, y la disposición a pagar por el sustituto y por el bien original es la misma.

Método de costo-efectividad

Esta metodología es similar al análisis costo-beneficio. Se emplea cuando:

- no están bien establecidas las relaciones dosis-respuesta, de forma que primero se fija el objetivo y luego se busca la forma más barata de alcanzarlo.
- la cantidad de dinero a emplear está predefinida.
- hay varios objetivos posibles, y cual de ellos se alcanzará depende del costo de las distintas alternativas.

3.2.2. Métodos basados en mercados implícitos

Estas técnicas, también denominadas de las *preferencias reveladas* se basan en que la valoración que realizan los individuos están contenida en las elecciones que realizan o las decisiones que toman.

Precio hedónico

El método del precio o valor hedónico consiste en proponer que el valor de un bien está compuesto por la suma del valor de ciertas características constituyentes del mismo. Por ejemplo, podría postularse (simplificadamente) que el precio del agua se compone por dos sumandos, uno dependiente de la calidad y el otro de la seguridad en la disponibilidad. Recopilando un gran número de datos experimentales, hay que aislar los que tienen igual disponibilidad, y *sólo* difieren en la calidad. Relacionando el precio con los distintos grados de calidad, se obtiene la valoración existente para la calidad del agua.

El principal problema es la cantidad de variables a considerar en su aplicación real, y la cantidad de datos a manejar para poder aislar la propiedad que interesa con claridad y confianza. Este método se ha empleado para el uso agrícola y para uso urbano.

Costo del viaje

Es el método más usado para estimar valores ambientales. Se centra en relacionar el valor ambiental del lugar bajo estudio con la suma de los costos incurridos por las personas que lo visitan, considerando desplazamiento desde el lugar de origen, costo de oportunidad del tiempo dedicado, gastos asociados al viaje, etc. Existen dos variantes principales, el modelo zonal y el individual. Este método presenta inconvenientes relacionados con la forma de ponderar el motivo de la visita, el valor del tiempo, etc. de los distintos visitantes del lugar bajo estudio.

A los efectos que aquí interesan, luego es complejo separar cuánto del valor de un lugar estudiado puede corresponderle al agua que existe en él.

3.2.3. Métodos basados en mercados contruidos

Valoración contingente

La valoración contingente estima el valor del bien sin mercado mediante las respuestas de cuestionarios acerca de la disposición a pagar por el bien o a aceptar compensaciones por renunciar a él, realizados a los usuarios reales y potenciales. En esta técnica es la única empleable para estimar valores de no-uso. Evidentemente en estas técnicas es crucial el diseño, ejecución, e interpretación de las encuestas.

Existe abundante literatura técnica sobre el empleo de este método, pudiendo mencionarse entre otros a [Hanemann, 1994, Diamond y Hausman, 1994, Carson et al., 1996, Schulze et al., 1996].

3.2.4. Métodos no-económicos

Programación matemática

Este método es muy empleado, en el cual se han realizado grandes avances en los últimos tiempos. Consisten en predecir las decisiones del agricultor ante distintos cambios en las condiciones del sector, y descubrir vía modelación como esta conducta afecta el consumo de agua.

Los principales factores que intervienen en esta clase de modelos son el patrón de cultivos posible, las condiciones del suelo, la tecnología de riego, los costos de los insumos productivos, el precio esperado de las cosechas, y las restricciones institucionales y sociales. Estos modelos intentan maximizar el beneficio económico de los agricultores, representado por una función lineal o no lineal [Hazell y Norton, 1986, Heady et al., 1973].

Estos modelos actualmente están evolucionando para reproducir el comportamiento *real* de los agricultores, que no siempre es el que les llevaría a maximizar sus ingresos monetarios.

El modelo SWAP [Howitt et al., 1999] es un modelo sofisticado perteneciente a esta categoría, que se ha empleado en California.

Métodos econométricos

Consisten simplemente en conseguir suficiente cantidad de datos reales que presenten cambios en la cantidad utilizada de agua y que mantengan razonablemente invariantes el resto de los factores, de forma de poder ajustar distintas relaciones funcionales (función Cobb-Douglas de elasticidad constante, función potencial, u otras similares) [Díaz y Brown, 1999].

3.3. Características de las curvas de demanda

3.3.1. Uso urbano

El uso urbano se suele desglosar en tres subcategorías:

- **residencial:** los que ocurren en las viviendas particulares. A su vez se subdividen en interiores (bebida, aseo, limpieza, etc.) y exteriores (riego de plantas, piscinas, etc.).
- **comercial-industrial:** para centros de servicios (hoteles, lavaderos, etc.), establecimientos comerciales y pequeña industria urbana.
- **servicios públicos:** para escuelas, limpieza de calles, bomberos, riego de parque, etc.

El uso residencial es el más estudiado, sobre todo el EE.UU., y del que se dispone de información más detallada. En [Díaz y Brown, 1999] puede encontrarse una muy buena reseña de distintos valores numéricos. Todos los estudios muestran que la demanda es inelástica, con valores de elasticidad comprendidos entre $-0,3$ y $-0,7$.

Evidentemente se sobreentiende en esta sección que se están considerando poblaciones con contadores de agua, ya que sistemas con tarifa plana o pago por unidad de vivienda son *per-se* insensibles al precio; y sólo se producirá una valoración positiva del recurso dependiendo de la conciencia ecológica y comunitaria del individuo, sin que medien incentivos económicos.

Esta demanda de agua es muy específica del lugar, dependiendo de factores naturales y socioeconómicos tales como:

- precio del agua o tarifa repercutida a los usuarios
- precio de una fuente de agua alternativa
- precio representativo de todos los bienes y servicios
- renta de los consumidores
- clima

- tipo de viviendas

[Schneider y Whitlatch, 1991] estudiaron separadamente la elasticidad del uso urbano, desagregada en seis sectores: residencial, comercial, industrial, municipal, escuelas y total para la ciudad de Culumbus (Ohio, EE.UU.). El uso de un modelo de regresión múltiple le permite afirmar que el precio es un factor determinante en todas las categorías, a excepción de la industria, en el caso de estudio. Estos estudios con desagregación sectorial permite luego el empleo de modelos que realicen el proceso inverso, para generar comportamientos de la demanda ante distintas condiciones hipotéticas [Dziegielewski y Boland, 1989].

A los efectos prácticos, y como se refirió en la sección 2.3.2, interesa aislar el comportamiento respecto al precio o tarifa. Para ello se construye una curva de demanda de validez local, que contiene la influencia de todos los factores distintos del precio. Normalmente se asume que la curva de demanda tiene elasticidad constante ($p = \kappa \cdot c^{\varepsilon^{-1}}$). En opinión del autor la forma de la curva no tiene excesiva influencia a los fines de obtener datos para los modelos a escala de cuenca, puesto que al interactuar con otros usos más elásticos, las reducciones de consumo en el uso urbano variarán en un estrecho rango, y por lo tanto no habrá mucha diferencia en adoptar otra forma más simple como la lineal.

La Figura 3.1 muestra los puntos correspondientes a ciudades españolas [LBA, 2000]. La gran variación del consumo *per-cápita* permite sospechar que se han dibujado valores correspondientes a todas las ciudades, sin seleccionar las que tienen características similares de clima, renta, etc., por lo que la curva ajustada sólo sirve como una muestra de tendencia y no para cálculos econométricos.

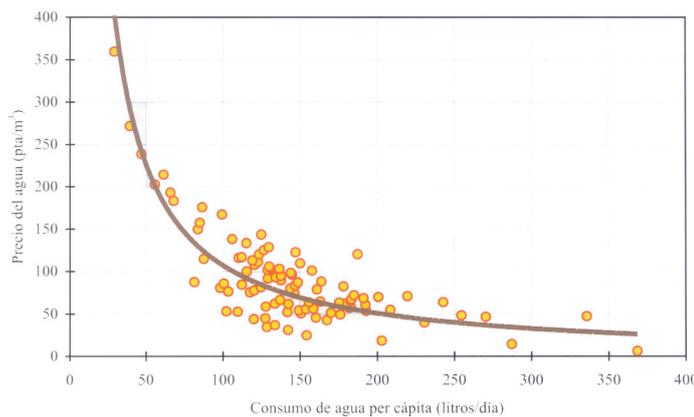


Figura 3.1: Consumo *per-cápita* vs. precio.

El método más habitual empleado para obtener la curva de demanda del uso urbano de una ciudad específica es la aproximación estadística o econométrica. Esta consiste en inferir una función de demanda mediante una regresión múltiple con datos de observaciones pasadas de cantidades consumidas, precios, rentas, clima y etc. Los datos pueden

provenir de varias observaciones a lo largo del tiempo en una misma ciudad (series de tiempo) o de observaciones simultáneas de varias ciudades durante el mismo período (corte transversal de datos). Se necesita un número suficiente de datos, provenientes de observaciones correctas, para estimar adecuadamente una función de demanda.

En ausencia de la información anterior, se suele adoptar el valor de elasticidad de estudios realizados en otras ciudades con condiciones similares, y conociendo los datos del punto actual, construir la curva de demanda a utilizar.

Si se quiere aplicar un desplazamiento de esta curva de demanda correspondiente al crecimiento vegetativo de la población con una tasa g , el valor de la constante puede calcularse como: $\kappa_t = \kappa_1 \cdot (1 + g)^{t-1}$.

Influencia de otros factores

La variación de la elasticidad con respecto a diversos factores puede verse en el Cuadro 3.2. La variación estacional está provocada fundamentalmente por los usos relacionados con riego de parques y jardines.

	elasticidad
invierno	-0,3
verano	-0,4

Figura 3.2: Elasticidad residencial en distintas estaciones.

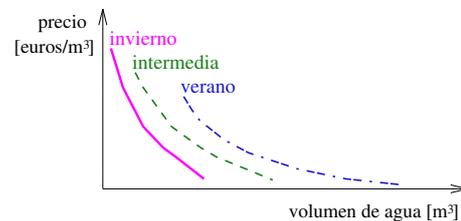


Figura 3.3: Curvas de demanda urbana en distintas épocas del año.

	elasticidad		elasticidad		elasticidad
en pico	-2,6 a -3,3	puertas adentro	-0,2	corto plazo	-0,14
fuera de pico	-0,7	total	-0,3 a -0,7	largo plazo	-0,50

Cuadro 3.2: Distintas elasticidades para la demanda residencial.

Otro de los factores que influyen en el consumo es la renta de las personas. Si bien la estimación de la elasticidad renta no es buena, por la dificultad de obtener datos fiables, los estudios indican que se trata de un bien normal (su consumo se incrementa cuando aumenta la renta), con una elasticidad en el rango 0,2 a 0,5. El incremento se debe sobre todo a las actividades recreativas vinculadas al agua (piscinas, etc.).

Estructura tarifaria

Dado que los usuarios son precio-aceptantes, el precio actual del agua de abastecimiento no puede ser tomado como valor de la misma. Pero al mismo tiempo, la estructura

tarifaria influye significativamente, ya que es mediante ésta que el usuario percibe (o no) señales de escasez, y en función de lo cual adaptará su comportamiento.

Lo usual es que la estructura tarifaria esté diseñada para cubrir suficientemente los costos medios de la empresa de suministro, y que se componga de un cargo fijo más un cargo variable en función del consumo; de forma que la tarifa no refleje el costo marginal de proveer el agua.

Por otra parte, el modelo presentado realiza la asignación de *agua cruda*, ya que se debe tratar con un bien homogéneo. Por lo tanto, los costes propios del cada uso deben ser descontados del valor del agua para obtener el valor del agua cruda. En este sentido el agua cruda consiste en un insumo (fundamental) para la producción de agua potable y distribuida. El Cuadro 3.3 muestra la composición de costos promedio en abastecimientos de la Comunidad Valenciana [AEAS-AGA, 2003, INE, 1998].

precio total	captación + potabilización	distribución	saneamiento
1,7 €	18 %	52 %	30 %

Cuadro 3.3: Composición del costo promedio del agua para uso urbano en la CV.

3.3.2. Uso agrícola

Este uso es el principal usuario y consumidor de agua en el mundo, y también en España. En zonas semiáridas puede alcanzar más de un 80 % del volumen extraído del ciclo natural. Además, la variación estacional del uso agrícola suele presentar los mayores requerimientos a finales del verano, por lo que no coincide con las mayores aportaciones naturales [Caballer y Guadalajara, 1998].

Para este uso el agua constituye un insumo agrario, por que se dice que esta es una demanda de agua *derivada* (derivada de la demanda de tomates, por ejemplo). Esto hace que dependa en gran medida del precio de los productos cultivados: si la producción disminuye por falta de rentabilidad, los precios de los tomates subirán, y esto recuperará la rentabilidad de los cultivos.

La demanda para este uso depende mucho de los siguientes factores:

- época del año.
- tipo de cultivo.
- ubicación de la captación respecto del lugar de uso.
- clima.
- características del suelo.
- calidad del agua.
- técnica de riego empleada.
- presencia de subsidios.

La curva de demanda debe ser **expresada en volumen de agua anual para el conjunto del área de cultivo considerada**. Es incorrecto trazarla en volumen por superficie cultivada, ya que en respuesta al aumento de precio, lo más usual es que disminuya la superficie cultivada por pérdida de rentabilidad, más que una disminución en el consumo unitario de agua. Esta curva es crucial, y debe ser estudiada cuidadosamente en función de las condiciones locales [Díaz y Brown, 1999].

Comprobando lo dicho en el párrafo anterior, [Sumpsi Viñas et al., 1998] destaca que no siempre una mejora tecnológica implica un ahorro de agua en el regadío. El riego por goteo ha disminuido el consumo de los regadíos ya instalados, pero esto ha permitido aumentar la superficie de cultivo, expandiendo el regadío a laderas y zonas carentes de suelo de génesis natural, en las cuales antes era impensable la existencia de cultivos. El balance de estas dos componentes muchas veces produce un aumento neto del consumo total de una región determinada. Un serio problema que se encuentra para este uso es la falta de datos confiables de volumen suministrado, como concluye el trabajo de [García Mollá, 2000].

La calidad del agua suele afectar el crecimiento y el rendimiento de los cultivos, dependiendo de la tolerancia de los cultivos a las sales y otros contaminantes. Y a su vez los efectos sobre la calidad del agua a causa del riego son numerosos: los retornos suelen contener pesticidas, fosfatos de los fertilizantes, sales disueltas, y sólidos en suspensión; perjudicando a los usos que se encuentran aguas abajo.

Las metodologías más empleadas para valorar el agua usada en regadío son:

1. Cambio de productividad: para unas condiciones dadas de las variables agrobiológicas, meteorológicas y del entorno, y fijado el valor de los restantes inputs del proceso productivo, se vincula el aumento marginal de producción con el aumento marginal de agua aplicada. El aumento de productividad por el precio del producto da el valor marginal del agua. Esto solo es válido para cambios pequeños en la cantidad de agua, porque si no se empiezan a modificar los restantes inputs o los costos. Estas estimaciones suelen hacerse mediante experimentos en parcelas controladas o con muestras de corte transversal de distintas explotaciones.
2. Desglose del presupuesto de las explotaciones agrarias: consiste en descontar de los ingresos provenientes de un cultivo determinado, todos los factores de producción, excepto el agua. Esta diferencia constituye una cota máxima (demasiado alta) del valor del agua de riego. Y la cantidad anterior dividida por el consumo de agua establece un límite al valor unitario del agua. Si solo se descuentan los costos variables se tendrá el valor a corto plazo, mientras que si se descuentan también los costos fijos se tendrá el costo a largo plazo. Una forma un poco distinta es comprar la diferencia de ingresos entre explotaciones de secano y de regadío, a igualdad de los restantes factores. Así se obtiene una valoración media del agua de regadío.
3. Programación matemática: se utilizan datos reales derivados de las cuentas de las explotaciones agrarias, y mediante programas informáticos se busca modelar las restricciones del medio y optimizar los beneficios de la explotación. Se obtiene así

una valoración normativa, porque puede diferir de la valoración de un productor que no sea cuidadoso en su estrategia de producción. El modelo de producción debe contemplar distintos cultivos, tecnologías existentes, restricciones económicas, fertilizantes, superficies cultivable, etc.

Ejemplos de modelos de esta son presentados por [Varela-Ortega et al., 1998] y por [Bontemps et al., 2001], quien desarrolla modelo multiperíodo, en el cual las decisiones del agricultor pueden variar a lo largo del tiempo.

La Figura 3.4 muestra una curva de demanda escalonada para una zona agrícola obtenida mediante un modelo de optimización agrícola [Díaz y Brown, 1999]. El gran escalón se debe a que en el distrito de riego modelado se combinan cultivos perennes con mayor capacidad de pago y cultivos estacionales con capacidad de pago menor.

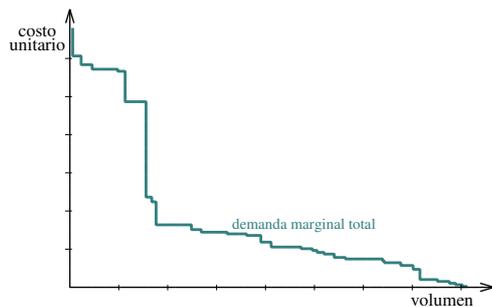


Figura 3.4: Curva de demanda del uso agrícola, obtenida por programación matemática.

Al igual que en el uso urbano, para obtener la curva de demanda de agua cruda hay que restar el costo que estarían dispuestos a pagar los usuarios por el sistema de distribución y aplicación. En sistemas de riego por gravedad estos costos son los gastos de construcción, mantenimiento y operación de presas y canales. En riegos con agua subterránea serán los costos de bombeo y monitoreo del acuífero.

Los agricultores toman decisiones que tienen que ver con distintos plazos de su actividad: desde decisiones interanuales hasta decisiones diarias de aplicar o no agua. Dependiendo de la duración del ciclo agrícola, la combinación de cultivos y áreas a sembrar puede ser una decisión anual o estacional. En el corto plazo, cuando las plantas están sembradas, la demanda de agua es muy inelástica. Por el contrario, a largo plazo se pueden introducir muchos cambios, y por ello la demanda es mucho más elástica.

Es importante considerar el rol de la incertidumbre en la elasticidad de la demanda para este uso: la aversión al riesgo hace que habitualmente se use más agua de la necesaria para la maximización del beneficio, y que sólo se reduzcan las aplicaciones si el costo sube.

La distribución mensual del uso depende mucho del clima, del tipo de cultivo, y de la cantidad de ciclos anuales. Las curvas de demanda mensual normalmente se obtienen por desagregación horizontal de la curva anual. Esta aproximación tiene la desventaja

que todas las curvas tienen el mismo precio máximo, lo cual no es muy real, pero se suele adoptar esta aproximación por simplicidad.

Este uso también ha sido objeto de numerosos estudios en EE.UU., especialmente en las zonas semiáridas [Vaux y Howitt, 1984, Howitt et al., 1999, Booker y Young, 1994], aunque no exclusivamente en esa zona [Taylor y Young, 1995].

La Figura 3.5 muestra curvas de demanda para uso agrícola en distintas zonas del Levante español, presentadas por [Sumpsi Viñas et al., 1998], y que constituyen la única referencia numérica de curvas de demandas en España a la fecha.

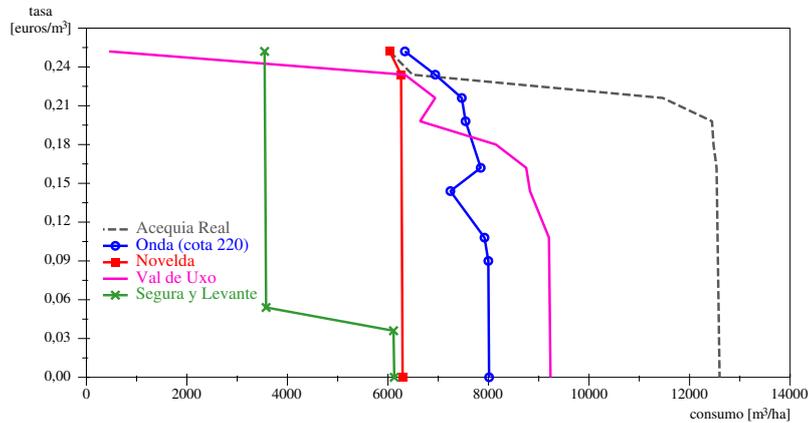


Figura 3.5: Curvas de demanda para uso agrario en el Levante español.

En el Júcar y Segura, la especialización hacia monocultivos de alto valor añadido (cítricos en Castellón, o uva de mesa en Novelda), junto con el muy reducido tamaño de las explotaciones, hace que las curvas sean casi por completo inelásticas. No puede darse la sustitución entre cultivos de regadío, y resulta económicamente inviable el paso a secano. Sería posible soportar aumentos de precios muy altos sin apenas reducciones de consumo, aunque a costa de la renta agraria.

La transformación de las dotaciones unitarias de estas curvas en demandas volumétricas, considerando las superficies afectadas y los volúmenes máximos actualmente demandados en cada caso, da lugar a los resultados regionales mostrados en la Figura 3.6, según [MMA, 2001].

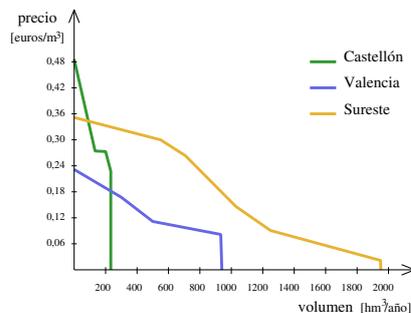


Figura 3.6: Curvas de demanda para uso agrario por zonas (PHN).

Otros factores que afectan la elasticidad en este uso son la disponibilidad de fuentes de agua alternativas (mayores alternativas implica mayor elasticidad), el valor de las cosechas (menor valor implica mayor elasticidad), los costes de producción (costes altos conllevan menor elasticidad), el agua aplicada (grandes volúmenes implican mayor elasticidad), la diversificación de cultivos (mayor diversificación supone mayor elasticidad), el tamaño de las explotaciones (tamaños reducidos implica menor elasticidad), los aspectos institucionales y organizativos, etc. [MMA, 2001].

Un interesante estudio sobre los efectos de cambios en la política tarifaria en los usos agrícolas es presentado por [Sumpsi Viñas, 2002], que cuantifica los efectos sobre la renta agraria, sobre la necesidad volumétrica de agua y sobre la recuperación de costes. Se desprende que la recuperación de costes debe aplicarse considerando las particularidades de las distintas cuencas, pero sobre todo, considerando los efectos sobre la renta de los agricultores, por los efectos sociales que esto conllevaría.

Tarifas actuales

En el regadío español existe una gran variabilidad de precios, incluso entre zonas muy próximas. Aunque estas cifras han de considerarse como meramente indicativas, y sujetas a elevadas dispersiones, la información aportada permite hacerse una idea de la situación actual de los precios pagados por los agricultores [MMA, 2001]:

- Acequia Real del Júcar: 0,006-0,036 €/m³.
- Canal cota 220, Onda: 0,095 €/m³.
- C.U. de Novelda 0,17 €/m³.

Los riegos tradicionales presentan tarifas muy baja, mientras que los riegos con aguas subterráneas o de trasvase presentan las tarifas más altas.

A nivel agregado, lo que pagan los usuarios agrícolas no alcanza a cubrir los costos de prestar el suministro, de forma que las cuentas del agua en España son deficitarias [Naredo y Gascó, 1994]. Esto refuerza la conveniencia de aplicar la recuperación total de los costos relacionados con los servicios del agua que promueve la DMA [UE, 2000], a efectos de racionalizar el uso de este recurso.

3.3.3. Uso hidroeléctrico

Este es un importante uso del agua. Comparada con la generación de energía alternativa más usual (la generación con centrales térmicas), la generación hidroeléctrica requiere una inversión más cuantiosa de capital, pero tiene menos gastos de operación y mantenimiento que ésta. La energía hidroeléctrica no produce contaminación del aire, y permite adaptarse rápidamente a las variaciones de la demanda energética. La demanda eléctrica tiene una fuerte variación horaria y semanal (Figuras 3.7 y 3.8), y esos patrones temporales de demanda hacen que este uso sea rival de otros usos.

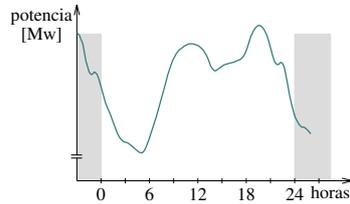


Figura 3.7: Variación diaria de la potencia eléctrica consumida.

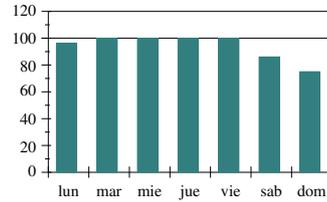


Figura 3.8: Variación semanal del consumo de energía, porcentajes respecto al miércoles.

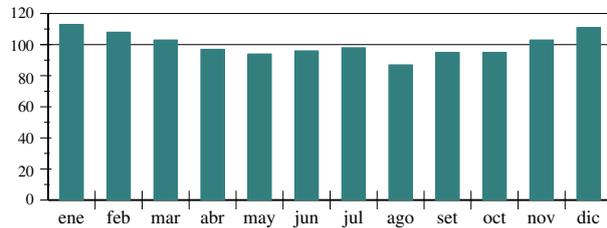


Figura 3.9: Variación mensual del consumo de energía, en porcentajes.

También para este uso, el valor asignado a este uso es muy específico del sitio, en particular de la existencia o no de conexiones que permitan comprar o vender energía dentro de una red regional o nacional.

La potencia y la energía generadas por una central hidroeléctrica se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$P[kw] = 9,81 \cdot \eta \cdot H_n[m] \cdot Q[m^3/s] \quad (3.1)$$

$$E[kwh] = P[kw] \cdot t[h] \quad (3.2)$$

siendo:

9,81 : aceleración de la gravedad, en m/s^2

η : rendimiento de la central ($\eta \leq 1$)

H_n : altura neta del salto

Q : caudal de agua turbinado

t : tiempo

De las ecuaciones anteriores se puede deducir que el operador de un embalse con fines hidroeléctricos pretenderá mantener la cota de éste lo más alta posible, para aumentar el valor de H_n , siempre que esto no implique perder volumen de turbinado al completarse la capacidad de almacenamiento y tener que dejar salir agua por el aliviadero.

Las centrales tienen una potencia instalada, o capacidad máxima de generación. El rendimiento de las turbinas es función de la altura y del caudal turbinado ($\eta = f(H, Q)$), por lo que es de interés generar en condiciones lo más próximas posibles a las de diseño, para conseguir mayores rendimientos.

Como la energía no se puede almacenar (en cantidades significativas), hay un equilibrio permanente entre la cantidad producida y consumida. Por ello el valor de la energía es distinto según se genere de forma permanente o sólo en los momentos de mayor demanda eléctrica, o en la jerga, según se trate de energía de base o energía de punta. La *energía de base* es la producida de una forma uniforme en el tiempo por instalaciones que tienen una inercia considerable, y que una vez que comienzan a producir no conviene que paren. La *energía de punta* es la que se adapta rápidamente a las variaciones de la demanda. Una central en particular puede funcionar como central de punta o de base.

El valor de la electricidad se suele determinar por el costo de producirla por el método alternativo más barato, y descontando de este valor todos los costos de la hidroelectricidad [Gibbons, 1986].

Habitualmente el precio de la electricidad está fuertemente regulado, y por esto no sirve de base para determinar el valor del agua para una central. Este valor es frecuentemente estimado con la técnica del costo alternativo, basado en el razonamiento de que la electricidad no producida por el agua debe ser producida de otra forma, y determinando entonces su costo. Esto es válido porque la red eléctrica es la suficientemente grande, y se dispone de cierta capacidad remanente disponible. La curva de demanda para un momento dado del día bien puede considerarse como una línea horizontal, pero como las centrales producen energía de punta o de base en distinta proporción, esta línea horizontal se puede modificar transformándose en una curva potencial. La única diferencia entre la curva anual y mensual está dada por la capacidad instalada de la central.

La demanda eléctrica depende de el crecimiento económico, de la temperatura, del efecto calendario (días laborables o no), etc.

3.3.4. Uso industrial

El principal uso industrial del agua es el enfriamiento de las centrales de generación eléctricas. Inevitablemente los usos industriales empeoran la calidad del agua.

Como los costos del agua representan una pequeña proporción de los costos totales [Gibbons, 1986], frecuentemente las decisiones relacionadas con el agua son secundarias para la industria. Los aspectos que más influyen en la cantidad de agua utilizada son los productos de salida de la industria y la tecnología empleada.

No abundan estudios sobre el comportamiento de este sector, pero pueden verse los trabajos de [Renzetti, 1988, Boland et al., 1984].

El valor marginal en este uso está limitado o “truncado” por el costo de instalar y operar sistemas de reciclado internos en las industrias [Gibbons, 1986], los cuales normalmente pueden conseguir una reducción importante en el consumo.

3.3.5. Uso para dilución de contaminantes

Este es otro importante uso, presente en casi todas las cuencas. Si el grado de contaminantes presentes es bajo, este uso se comporta como un uso no rival; pero si la contaminación es alta puede perjudicar seriamente o incluso impedir otros usos consuntivos ubicados aguas abajo del punto de descarga.

[Merritt y Mar, 1969] estimaron el valor del agua para diluir contaminantes como el costo del tratamiento de los efluentes. Sin embargo, ése valor es una cota superior de la disposición a pagar con el fin de dilución. Otra aproximación mediante la técnica del costo alternativo es considerar el costo de oportunidad de la cantidad de agua necesaria para lograr el mismo grado de dilución.

Cuando éste uso es importante, aparece el problema clásico de determinar el grado de contaminación óptimo, ilustrado en la Figura 3.10 [Young, 1996b, Tietenberg, 1992], en el cual el análisis económico marginal ayuda a determinar el grado de contaminación óptimo a permitir en un cauce.

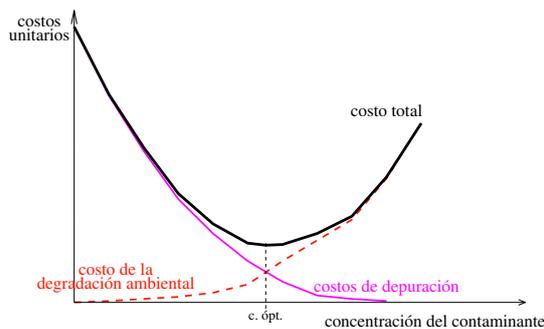


Figura 3.10: Variación de los costos totales en función de la concentración.

El público desearía una descarga de desechos casi nula, pero esto puede ser enormemente caro, o casi imposible, a menos que las principales industrias cierren. Reconociendo la necesidad de que exista un cierto intercambio de recursos escasos, se hace necesario balancear estos intereses enfrentados.

Se asume que se conoce el efecto adverso de distintas concentraciones del contaminante, y que se les puede asignar un valor monetario a esos efectos. Las descargas contaminantes pueden ser reducidas mediante el tratamiento cuyo costo puede conocerse. La variable de interés es la concentración del contaminante, mostrada en el eje horizontal. El

costo de tratamiento aumenta cuando la concentración disminuye. La disposición a pagar de los beneficiarios es asumida como el daño evitable mediante el tratamiento. Los daños evitados disminuyen cuando se reduce la concentración del residuo (línea de trazos). El costo total, para cualquier concentración, es la suma de los costos de tratamiento más los costos por daños (curva gruesa). El nivel óptimo de contaminación está dado por el mínimo de la curva gruesa, o lo que es lo mismo, donde se iguala el costo marginal de reducir la concentración del contaminante con el beneficio marginal derivado de evitar las externalidades de la presencia de dicho contaminante. Ni el emisor ni el receptor están completamente satisfechos con esta posición de compromiso; el receptor preferiría que no hubiera daños, mientras que el emisor preferiría no incurrir en los costos de tratamiento. El óptimo para la sociedad no coincide con el óptimo de ninguna de las partes consideradas individualmente.

3.3.6. Uso recreativo

Los caudales fluyentes tienen efectos inmediatos y diferidos [Díaz y Brown, 1999] sobre las actividades recreativas (deportes acuáticos, pesca, camping, campamentismo, senderismo, etc).

- el efecto inmediato es por ejemplo el que tiene sobre el piragüismo el caudal del río. La curva de demanda entonces tiene una forma de u invertida si se grafica respecto al caudal circulante [Brown et al., 1991].
- el efecto diferido se refiere a que la reproducción de peces, vegetación ribereña, etc. que no dependen del caudal circulante en el instante actual sino en los de un cierto tiempo anterior.

Los métodos usuales de evaluar el valor del agua para este uso son el método del valor contingente y el método del costo de viaje.

Los estudios son diversos; algunos intentan considerar el efecto de la congestión de visitantes y el efecto de la calidad del agua. Los estudios se han hecho entre primavera y otoño (de marzo a octubre); aunque como hay muy pocos estudios discriminados mes a mes [Daubert y Young, 1981], normalmente se usa la misma curva para todos los meses.

Entre los estudios que pueden mencionarse, [Duffield et al., 1992] obtiene valoraciones para este uso superiores al valor para irrigación, proponiendo una reasignación del recurso; [Walsh et al., 1992] re-evalúa estudios anteriormente realizados sobre la demanda de agua puertas afuera con fines recreativos, a fin de comparar los distintos métodos y proponer mejoras metodológicas de los mismos.

Este uso tiene una variación semanal importante: los fines de semana y festivos (feriados) el valor es mayor que en los días laborables. Para representar esta variación semanal el período temporal de un mes no es adecuado, porque las variaciones semanales mencionadas quedan “enmascaradas” o diluidas al usar un periodo tan amplio; de forma que si en un SRH a modelar este uso fuera determinante, habría que usar un paso temporal menor.

3.3.7. Uso ambiental

El empleo de agua con fines ambientales de conservación de los ecosistemas y hábitats es un uso muy importante, aunque es difícil la estimación de su valor. Sin embargo, su contribución al bienestar de la sociedad no es despreciable: por tratarse de un uso público, aunque el valor para una persona sea muy bajo, multiplicando éste valor por todos los individuos que lo disfrutan, se obtienen valores totales importantes que deben ser tenidos en cuenta a la hora de la toma de decisiones [Loomis, 2000].

Ya se mencionó la complejidad de este tipo de valoraciones, por las subjetividades que llevan implícitas. Sin embargo, en los últimos tiempos se han hecho avances importantes en los aspectos conceptuales y metodológicos en esta materia [Braden, 2000, Brown y Duffield, 1995], lo que sugiere que dentro de un tiempo estos estudios serán habituales y establecidos.

Aunque se tenga conciencia de las limitaciones de estas valoraciones, su consideración ayuda a que un mecanismo de mercado sea aplicable a la gestión del agua, controlando las externalidades negativas [Colby, 1990].

3.3.8. Otros usos

Finalmente hay que mencionar que existen otros usos, no tan frecuentes como los anteriores, pero que cuando existen también deben ser adecuadamente considerados, tales como el uso recreativo en embalses, la pesca comercial en embalses y lagos, el uso para navegación fluvial o funcionamiento de esclusas, etc.

3.4. Sistemas tarifarios

Ya se ha hablado algo de los sistemas tarifarios existentes y su influencia primordial en el comportamiento de los usuarios/consumidores. Casi sin excepción, los objetivos de todo sistema tarifario son dos:

- permitir la recuperación de costos de provisión del servicio (o una parte de ellos).
- trasladar señales de escasez conforme a la capacidad del sistema instalado o proyectado.

Hay tres razones para que el sistema tarifario se base en el costo marginal:

1. a largo plazo, evita que las agencias públicas tengan déficit, y permite que tengan señales para anticiparse a los problemas.
2. traslada a los usuarios el coste real de la provisión del servicio.
3. aprovechar las instalaciones al máximo de su capacidad.

Pero también hay inconvenientes (tanto conceptuales como prácticos) que dificultan la aplicación de precios basados en el costo marginal de la provisión del servicio:

- los programas alternativos de inversiones no son divisibles, por lo que generan funciones de costos no continuas.
- las funciones de demanda no son estáticas en periodos grandes de tiempo.
- el costo marginal es distinto según se considere corto plazo o largo plazo.
- los cambios de los precios relativos de los inputs y de la tecnología provocan desplazamientos de las funciones de costos.
- no está claro si el costo marginal debe calcularse para el sistema instalado o para el sistema óptimo al iniciarse el proyecto.
- la función de demanda es estacional, y esta estacionalidad depende de factores climáticos (aleatorios).
- la fiabilidad del servicio (garantía) ha de incorporarse en el diseño de la tasa pública.

Estos inconvenientes son suficientemente poderosos, puesto que la inmensa mayoría de las políticas tarifarias urbanas están basadas en el costo medio y no en el marginal.

3.5. Comentarios finales

A modo de resumen de este capítulo se puede decir que la valoración del agua (en los distintos usos a los que se puede destinar), es un aspecto complejo, en el que las extrapolaciones de estudios realizados en otros lugares suelen no ser válidas. Además la valoración va cambiando con el paso del tiempo, conforme cambian las actividades productivas de una región y las actividades y gustos de los habitantes del lugar y los visitantes.

Como se dijo con anterioridad, cualquier curva de demanda se obtiene bajo un conjunto de hipótesis simplificadoras iniciales que se ha de conocer. Y siempre es posible una mejor aproximación a estas curvas, si se dispone de más datos o se realizan estudios más detallados.

Especial atención merecen las estimaciones de los usos públicos del agua, que tradicionalmente han estado menospreciados por los gestores y tomadores de decisiones con un enfoque productivo de la sociedad y la economía.

Capítulo 4: Programa EcoGes

En este capítulo se describe el programa EcoGes, que es un modelo genérico para optimizar la asignación de agua en sistemas de recursos hídricos (SRH), con criterios de eficiencia económica.

En primer término se realizan unos comentarios preliminares sobre los modelos basados en prioridades (tradicionales) y modelos basados en la asignación eficiente de recursos (como el que se presenta aquí); mencionando las utilidades que puede reportar el uso de modelos de asignación económicamente eficiente.

A continuación, en la sección 4.2 se describe el funcionamiento del modelo de optimización OptiGes, por ser el punto de partida del modelo desarrollado, y la interfaz OptiWin, ambos pertenecen al SSD Aquatool. OptiWin también se usa para diseñar el sistema de recursos hídricos a tratar con EcoGes.

La sección 4.3 es la parte central de este capítulo, donde se describe en detalle el modelo EcoGes: sus características, la función objetivo optimizada, las restricciones admitidas, las limitaciones que esto impone en la representación de la realidad.

Posteriormente, en la sección 4.4 se describen otras capacidades, que sin constituir la novedad fundamental del modelo, enriquecen sus posibilidades en la representación del ciclo hidrológico respecto al modelo precedente.

La sección 4.5 presenta un breve apartado con las instrucciones de uso del software desarrollado.

Y finalmente, en la amplia sección 4.6 se presenta una docena de casos simples de ejemplo. Estos casos simples ayudan a comprender el funcionamiento de un mercado perfecto en la asignación del agua, y cómo interactúan y se influyen mutuamente los distintos componentes de una cuenca. Esto demuestra la necesidad ineludible de realizar los estudios económicos representando la totalidad de la cuenca mediante modelos.

4.1. Motivación y utilidad

Las leyes que rigen la gestión y asignación del agua suelen conceder un papel central al Estado, como regulador del recurso hídrico, fundamentado en el carácter público del mismo. Sin embargo, las peculiaridades del agua reseñadas en la sección 3.1.2, y sobre todo la dificultad de alcanzar acuerdos socio-políticos para reformar las leyes o las reglamentaciones del agua con celeridad, hacen que en muchos casos estas leyes no reflejen la realidad de los conocimientos científicos del momento actual, y que sean muy estáticas. Por ejemplo, en muchos países —todavía hoy— para el derecho el agua subterráneas es un bien privado, no vinculado con el agua superficial.

Excepto en cuencas donde la abundancia del recurso sea muy grande, la entrada de nuevos usuarios en un sistema perjudicará a los usuarios ya establecidos de una u otra forma. Esto hace que normalmente el Estado establezca un sistema de prioridades de uso basado en el tiempo de establecimiento y en el tipo de uso (urbano, agrícola, eléctrico, etc.), refrendado legalmente mediante concesiones. Con el tiempo, cuando el recurso se vuelve escaso, no se conceden nuevas concesiones. Esta forma de gestión rígida, al no reconsiderar las concesiones antiguas, no permite reorganizar los usos, y deja muy poco margen para hacer lugar a nuevas necesidades de la sociedad, como por ejemplo las paisajísticas, lúdicas y ecológicas.

Así, esta gestión por prioridades puede volverse muy ineficiente, si se concede el recurso para usos poco valiosos, y no se da cabida a nuevos y más valiosos usos.

Los cambios en la forma de vida, la renta, la distribución de la población, y/o la tecnología hacen que con el paso de algunas décadas el valor del agua en distintos usos cambie, como lo prueba una retrospectiva sobre el pasado reciente. Si este comportamiento dinámico de la sociedad (y con ello de la demanda de agua) no es acompañado por la reasignación del recurso, se está incurriendo en ineficiencias.

La Administración, como “dueña” y responsable del recurso hídrico público, no sólo debe cuidarlo, sino que debe asignarlo a los usuarios que mejor provecho puedan sacarle. Por ello, reconociendo que las leyes son las que son, y que la asignación actual es resultado de múltiples factores, será de mucha utilidad comparar la asignación actual con una asignación económicamente eficiente. Esto permitirá detectar, y sobre todo cuantificar, las pérdidas económicas en las que se incurre con la gestión actual, como primer paso para revertirlas.

El uso del modelo de asignación económicamente eficiente del recurso hídrico permitirá, entre otras, las siguientes utilidades:

- Detectar situaciones favorables para la negociación de agua entre usuarios o usuarios potenciales (mercados).
- Identificar infraestructuras que deben ampliarse o reglas de gestión a modificar para mejorar el beneficio económico.
- Detectar usos claramente ineficientes que son financiados con fondos públicos, para proceder a su reconversión o eliminación.

4.2. Breve descripción de OptiGes

OptiGes [Andreu, 1992b] es un modelo de optimización lineal de la gestión de sistemas de recursos hídricos, que forma parte del SSD Aquatool [Andreu et al., 1996]. El esquema del SRH a optimizar se introduce mediante una interfaz gráfica (OptiWin), que permite agregar uno a uno los elementos y las propiedades de cada uno.

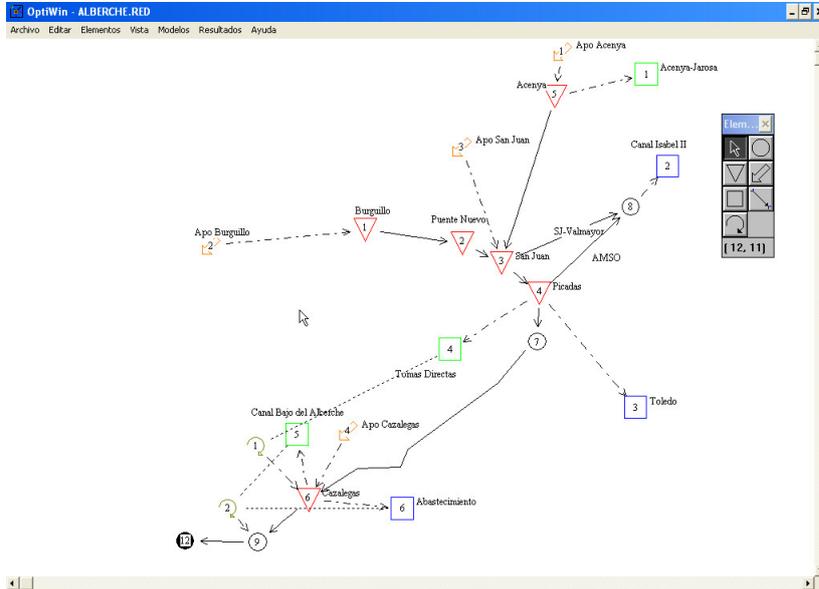


Figura 4.1: Ventana de OptiWin, SSD Aquatool.

Los elementos admitidos en OptiGes son:

- aportaciones.
- conducciones (sin pérdidas ni ganancias).
- demandas.
- embalses.
- retornos.

Una vez que el esquema está finalizado (Figura 4.2), el usuario ejecuta el modelo de optimización OptiGes. Hecho esto, el usuario puede ver los resultados de la optimización mediante la interfaz.

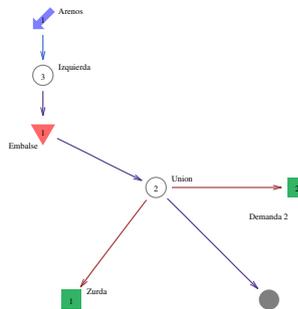


Figura 4.2: Esquema de un SRH.

Las tareas que realiza OptiGes al ser ejecutado pueden encontrarse en forma detallada en [Andreu, 1992b], pero pueden resumirse en las siguientes tres:

1. **Crea la red de flujo (internamente):** La red de flujo se construye basándose en el esquema diseñado por el usuario y de las características de los elementos introducidas. Esta red es bastante más compleja que el esquema, sobre todo porque incorpora la dimensión temporal¹; pero como se crea automáticamente el usuario no advierte esta complejidad.

La red de flujo es cerrada y conservativa, y se compone de arcos que conectan nodos. Los arcos se caracterizan por las siguientes propiedades:

- nodo inicial y final
- límite inferior de flujo l_i
- límite superior de flujo u_i
- la contribución del arco i a la función objetivo es $f_i = c_i \cdot x_i$

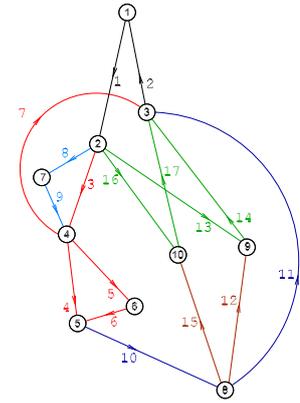


Figura 4.3: Red interna del esquema de la figura anterior, para un intervalo de tiempo.

2. **Minimiza la función objetivo en la red de flujo:**

La función objetivo (FO) a minimizar es:

$$FO = \sum_{i=1}^{nA} c_i \cdot x_i \quad (4.1)$$

Siendo nA : número de arcos.

Los valores de c_i se denominan *costos ficticios*, y dependen de las prioridades de los elementos (pr_j); de unos coeficientes $K_1, K_2, K_3, etc.$; y solo para las conducciones del valor que introduzca el usuario. Los coeficientes K_i no se suelen modificar (aunque puede hacerse), sino que se aceptan los que usa por defecto el programa, que funcionan bien en la mayoría de los casos reales.

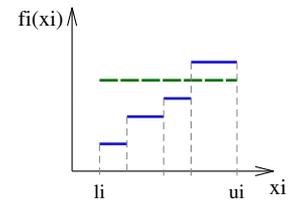


Figura 4.4: Funciones de precio unitario.

La Figura 4.4 muestra los dos tipos de funciones de precio unitario: la función escalonada para embalses y demandas (en línea llena); y la función constante (independiente del flujo) para el resto de los elementos (en línea de trazos).

Esta *forma* de la FO (Ecuación 4.1) está fija, y no puede modificarse. Esto puede verse como una limitación o como una ventaja. Desde el primer punto de vista no permite ajustes para casos particulares que no respondan a la forma de la FO adoptada. Desde el segundo punto de vista facilitan el uso del programa, al no tener el usuario que pensar en cómo son y definir una a una las funciones f_i de cada elemento: lo hace automáticamente el programa con la sola definición de las

¹La red de flujo de la Figura 4.3 corresponde al esquema de la Figura 4.2, para un intervalo de tiempo. Al optimizar conjuntamente n_T intervalos de tiempo, la red adquiere *profundidad temporal* y la cantidad de arcos aumenta aproximadamente n_T veces.

prioridades relativas de unos elementos sobre otros (véase el segundo párrafo de la sección 2.2.2 en la página 23). La definición de prioridades relativas entre elementos es fácil e intuitiva para usuarios inexpertos.

La minimización se resuelve mediante un algoritmo de las desviaciones (out-of-kilter), que es muy eficiente en la minimización de funciones lineales en redes de flujo. Del proceso de resolución de la red hay que destacar lo siguiente:

- En la resolución del problema se recurre a iteraciones, debido a las no linealidades que se quiere conservar: evaporación de embalses. Inicialmente las evaporaciones se suponen nulas y se resuelve la red interna; en función del volumen de los embalses se estima la evaporación, y con este valor se vuelve a resolver la red, y se continúa ese ciclo hasta que se satisface un criterio de estabilidad de las soluciones. En ese momento tenemos la solución definitiva.
- Cuando el problema tiene soluciones múltiples (todas con igual valor de la FO), el algoritmo se detiene en la primera que encuentra. Por ejemplo, si en el esquema de la Figura 4.2 las dos demandas tienen la misma prioridad, y no hubiera agua suficiente para abastecer a ambas en algún periodo de tiempo, se abastecería completamente una de ellas, y el déficit se acumularía en la otra². Para minimizar este efecto, el volumen de las demandas se particiona en 4 arcos, con 3 valores porcentuales dados por el usuario. El primer arco es más prioritario que el segundo, etc. Entonces, primero se satisfacen todos los primeros arcos, luego los segundos arcos, etc. Un mecanismo similar hay para segmentar el volumen almacenado en embalses. Este mecanismo es una linealización a trozos de una función no lineal para el elemento en cuestión.

3. Restituye los resultados al esquema:

A partir de la solución óptima de la red interna, realiza el camino inverso del punto 1, y traduce el resultado a los valores de estado de los elementos del esquema, que son los que le interesan al usuario. También calcula indicadores de servicio (garantías) y crea los archivos de salida y gráficos (Figura 4.5) de las variables.

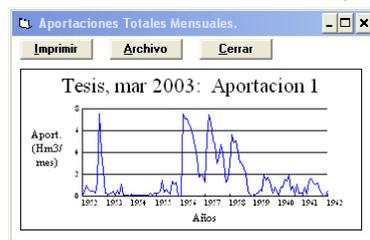


Figura 4.5: Gráficos de resultados de OptiWin.

Hasta aquí, una breve síntesis del funcionamiento de OptiGes.

²En los problemas lineales la región factible está limitada por líneas rectas; y las líneas de isovalor de la función objetivo también son rectas. Si la línea de isovalor óptimo coincide con un límite de la región factible, hay un segmento de múltiples soluciones óptimas (situación de indiferencia). Los algoritmos de solución clásicos recorren el borde de la región factible, siempre arribarán primero a un extremo del segmento.

4.3. Descripción de EcoGes

EcoGes es un modelo general o genérico para optimizar la asignación de agua cruda en un SRH (o cuenca), para conseguir la eficiencia económica en el uso del recurso hídrico.

La palabra *optimizar* debe entenderse en sentido restrictivo que el resultado es la mejor asignación para el modelo construido, con la función objetivo, los parámetros y las restricciones adoptadas.

El adjetivo *cruda* enfatiza que se asigna un único bien. No sería correcto comparar dos bienes distintos como agua sin tratar (cruda) para riego con agua potabilizada uso residencial. Por este motivo a la demanda de agua potable habrá que descontar previamente los costos de tratamiento y distribución.

El término *eficiencia económica* se entiende en el sentido de Pareto (véase sección 2.3.2), no en el sentido de que no existan fugas o pérdidas de agua (aunque esa situación también puede ser económicamente ineficiente). Para la totalidad del SRH, la eficiencia económica se consigue cuando la suma de los beneficios en los usos menos los costos de suministro es tan alta como sea posible, cumpliendo las restricciones físicas y operativas del sistema.

En términos matemáticos, la función objetivo a maximizar es:

$$Bn = \sum_{k=1}^{nT} \frac{1}{(1+i)^k} \left(\sum_{e=1}^{nE} (B_{ke} - C_{ke}) \right) \quad (4.2)$$

Siendo: nT : número de periodos (meses) a optimizar.
 nE : número de elementos del sistema.
 B_{ke} : beneficio del flujo por el elemento e en el periodo k .
 C_{ke} : costo del flujo por el elemento e en el periodo k .
 i : tasa de interés mensual.

sujeta a las restricciones del sistema.

Debido a que los costos y los beneficios marginales varían con el volumen asignado (Figura 4.6[A]), la necesidad de representar esto conduce a que la función objetivo Bn sea una función no lineal.

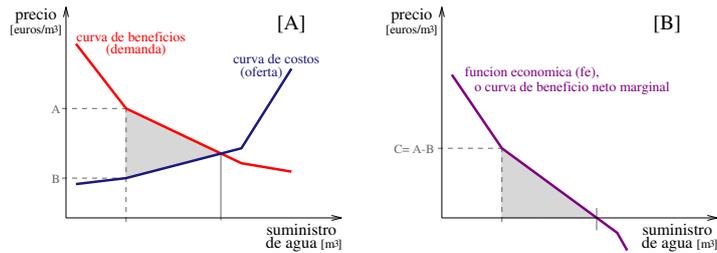


Figura 4.6: Función económica de un elemento del SRH.

Como cada elemento puede tener tanto beneficios como costos, a efectos operativos resulta más cómodo definir una función económica (f_e), que es la diferencia de los beneficios menos los costos para cada valor de asignación, tal como muestra en la Figura 4.6 al pasar del gráfico[A] al [B].

Esta función (f_e) de beneficio neto podrá tener tanto valores positivos como negativos. Si se trata de un uso que no tiene costos, la función económica coincide con la curva de demanda del uso. Note el lector que el área sombreada es la misma en ambas figuras.

Con esta modificación, la función objetivo es:

$$Bn = \sum_{k=1}^{nT} \frac{1}{(1+i)^k} \left(\sum_{r=1}^{nE} \int_0^{x'_{ke}} f_{e_{ke}}(x_{ke}) dx_{ke} \right) \quad (4.3)$$

sujeto a: $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{0}$: conservación de masa.

$\mathbf{l} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{u}$: restricciones de capacidades de los elementos.

siendo: x'_{ke} : cantidad en el periodo de tiempo k para uso e (incógnitas).

$f_{e_{ke}}$: la función económica en el periodo de tiempo k del uso e (datos).

Otras relaciones entre variables del problema, como por ejemplo el volumen evaporado con el volumen embalsado o el retorno con el volumen asignado al uso, etc. se hacen cumplir mediante un mecanismo iterativo que se explicará más adelante.

Para simplificar el desarrollo, en lo sucesivo el término correspondiente a la actualización en la ecuación 4.3 se omite, asumiendo $i = 0$. Esto no quita validez a ninguna consideración posterior, puesto que i es un parámetro independiente del resto de variables y parámetros, que se asume como dato.

Así, conocida la valoración del agua en los distintos usos, y los costos de suministro mediante distintas infraestructuras, se aplica un mecanismo de mercado perfecto para la asignación del agua entre todos los usos y todos los intervalos temporales modelados. El resultado es la asignación eficiente del agua entre los usos potenciales del sistema.

Siguiendo la clasificación presentada en la sección 2.1.1, EcoGes es un modelo:

- determinista: asume un conocimiento perfecto del futuro en cuanto a las aportaciones hidrológicas, los parámetros físicos y económicos de los elementos, etc. Este conocimiento perfecto del futuro (o incertidumbre nula) conlleva un riesgo mínimo de desabastecer a los usos.
- intervalo temporal constante de un mes: para cada intervalo temporal se modela un único valor (el valor medio).
- de estado estacionario: asume que el cambio entre el estado en dos intervalos consecutivos es suficientemente rápido como para que los efectos transitorios sean despreciables.
- los usos son independientes unos de otros: las funciones económicas y curvas de demandas de cada elemento no dependen de los otros elementos del sistema.

EcoGes puede considerarse como una ampliación de OptiGes, frente al que presenta las siguientes mejoras:

1. Permite optimizar una función objetivo no lineal
2. La función económica puede ser distinta de un mes a otro
3. Se pueden incluir en la optimización los acuíferos
4. Permite descontar de las demandas el efecto de la precipitación

En lo que resta del capítulo se describirán distintos aspectos del modelo EcoGes, se discutirán las dificultades encontradas y las soluciones finalmente adoptadas.

4.3.1. La función objetivo

Construir un modelo genérico implica definir a priori un tipo o forma de función objetivo, que sea suficientemente amplia para representar o abarcar las situaciones más corrientes que se presenten en su aplicación.

La propiedad principal de EcoGes es permitir usar una función económica compleja (de beneficio neto marginal) para cada elemento del sistema, y que puede ser diferente para cada mes del año. Para evitar discontinuidades en la función objetivo e inestabilidades numéricas en los algoritmos empleados, es conveniente que la función económica sea continua y derivable; por lo tanto se adoptó la siguiente función paramétrica para el elemento i :

$$fe_i = a_i + b_i \cdot x_i + c_i \cdot x_i^2 + f_i \cdot x_i^{g_i} \quad (4.4)$$

donde a_i , b_i , c_i , f_i , y g_i son parámetros (datos), y x_i volumen asignado es una incógnita del problema. La función de la Ecuación 4.4 es flexible para representar distintas formas de funciones económicas (Figura 4.7). Normalmente, en cada elemento sólo unos pocos parámetros anteriores serán no nulos.

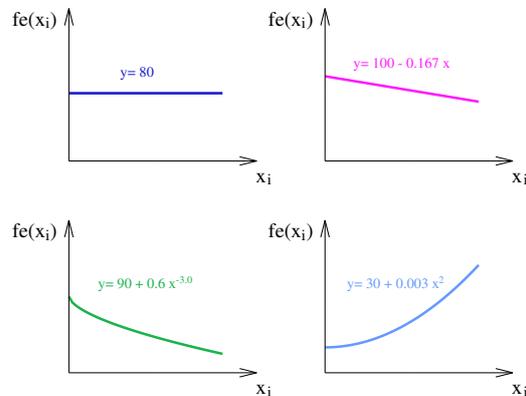


Figura 4.7: Ejemplos de posibles formas de la fe admitidas en EcoGes.

Reemplazando la ecuación 4.4 en la ecuación 4.3, e integrando para un valor de x'_i genérico, la función objetivo a maximizar es:

$$Bn = \sum_{k=1}^{nT} \sum_{i=1}^{nE} \int_0^{x'_{ki}} (a_{ki} + b_{ki} \cdot x_{ki} + c_{ki} \cdot x_{ki}^2 + f_{ki} \cdot x_{ki}^{g_{ki}}) dx_{ki} \quad (4.5)$$

donde x'_{ki} es el volumen asignado al elemento i en el periodo k .

Como se admite una función económica distinta de un mes a otro, es conveniente reemplazar en la notación anterior el periodo a optimizar k por dos variables: j para el mes ($j = 1, \dots, nM$) y h para el año ($h = 1, \dots, nA$). Con este cambio de variables se tiene que: $k = h \cdot nM + j$, y $nT = nM \cdot nA$. Normalmente $nM = 12$.

Finalmente la función a maximizar es:

$$Bn = \sum_{h=1}^{nA} \sum_{j=1}^{nM} \sum_{i=1}^{nE} a_{ji} \cdot x'_{hji} + \frac{b_{ji}}{2} \cdot x'^2_{hji} + \frac{c_{ji}}{3} \cdot x'^3_{hji} + \frac{f_{ji}}{(g_{ji} + 1)} \cdot x'^{(g_{ji}+1)}_{hji} \quad (4.6)$$

Esta función es separable, porque cada término depende de una sola variable: el flujo x_{hji} de cada arco. Esta separabilidad simplifica el proceso de optimización, pero al mismo tiempo limita las posibilidades de representación de la función objetivo, como se verá en el apartado siguiente.

Limitaciones de la función objetivo

La separabilidad de la función objetivo adoptada presenta algunas limitaciones para representar adecuadamente ciertos aspectos. Por ejemplo en los bombeos, el costo de extracción depende tanto del volumen bombeado como de la profundidad de bombeo (o del estado del acuífero correspondiente, si se prefiere). En términos matemáticos:

$$costo = K \cdot x_{vol. bombeo} \cdot x_{prof. acuífero}$$

Para solventar este inconveniente se recurre a un ajuste iterativo del costo en función del volumen almacenado en el acuífero en el intervalo precedente. Inicialmente se asume un costo; con esto se obtiene la asignación óptima; y con esta asignación se obtiene el estado del acuífero. Con dicho estado se puede re-estimar el costo vinculado con la profundidad de bombeo. Se repite este ciclo hasta que se las variaciones en dos iteraciones sucesivas están por debajo de un valor de error predefinido como aceptable.

Este mecanismo iterativo, es honesto admitirlo, no asegura que se alcance la misma solución que si se modelara dicho costo mediante un término no separable, como el de la fórmula precedente. Pero la experiencia indica que en muchos casos la aproximación separable iterativa no difiere demasiado del verdadero valor, y por ello se usa este mecanismo, al tiempo que se es consciente de esta debilidad.

Condiciones del óptimo global

En la sección 2.2.3 se expusieron las condiciones requeridas para que un problema de optimización no lineal tuviera una solución única, que son:

- en una minimización: que la función objetivo sea convexa.
- en una maximización: que la función objetivo sea cóncava.

Una función separable es cóncava (o convexa) si cada término de dicha función es cóncavo (o convexo). Derivando la expresión de la función a maximizar (ecuación 4.6) se obtiene:

$$\frac{dBn}{dx'_{ki}} = a_{ki} + b_{ki} x'_{ki} + c_{ki} x'^2_{ki} + f_{ki} x'^{g_{ki}}_{ki} \quad (4.7)$$

$$\frac{d^2Bn}{dx'^2_{ki}} = b_{ki} + 2c_{ki} x'_{ki} + f_{ki} g_{ki} x'^{(g_{ki}-1)}_{ki} \quad (4.8)$$

Por lo tanto se requiere que para todas las variables (x'_{ki}), la ecuación 4.8 sea igual o menor que cero dentro de la región factible, para que el problema tenga un único máximo local, coincidente con el global. Si esto no es así, el problema tiene varios máximos locales.

Problema con varios mínimos locales

Los problemas no lineales en los que no se puede asegurar la existencia de un único mínimo local, como el que muestra la Figura 4.8 para un problema bidimensional, presentan un grave inconveniente debido a la incertidumbre del resultado alcanzado; puesto que como se mencionó en la sección 2.2.3, los algoritmos de gradiente se detienen al alcanzar un mínimo local.

En los problemas que tienen varios mínimos, el mínimo alcanzado por el algoritmo dependerá del punto inicial suministrado, como puede verse para un ejemplo simple en el Anexo A.

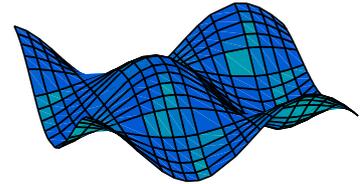


Figura 4.8: Función objetivo bidimensional con muchos mínimos locales.

Para estos problemas es importante el conocimiento que tenga, o que pueda lograr el usuario, acerca de la “forma” de la función objetivo. De más está decir que resulta difícil pensar en forma cuando la dimensionalidad del problema es mayor que tres.

Si no hay otro remedio que lidiar con un problema con múltiples mínimos, la recomendación principal es que la cantidad de variables sea la menor posible, ya sea reduciendo el periodo de análisis o simplificando la configuración del sistema a analizar, para trabajar con un problema mediano o pequeño.

Para estos casos, EcoGes permite resolver el problema partiendo de distintos puntos iniciales y comparar los resultados para quedarse con el que consigue el menor valor de la función objetivo. Los puntos iniciales los puede proveer directamente el usuario mediante un archivo de texto, o se pueden generar de forma aleatoria con intervención del usuario, mediante una subrutina que se describe a continuación:

- Una vez diseñada la red y las condiciones de contorno, podemos determinar de las inecuaciones que definen el problema, cuantos grados de libertad (gl) o variables de libre elección tiene el problema planteado. Esto se le informa al modelador para que pueda escoger que variables elegirá para determinar un punto inicial.
- Con los valores dados por el usuario las gl variables se determinan inmediatamente las restantes (n-gl) variables para conseguir un punto de inicio factible.
- Se resuelve el problema mediante LSNN0 y se guardan los valores de las variables gl y el valor del mínimo local alcanzado.
- el proceso de optimización se reinicia tantas veces como el modelador desee. Finalmente se elige el menor valor de mínimo local como el mínimo global.

Esta metodología permite que sea el modelador quien elija las variables que determinarán el punto de inicio, a partir de su experiencia y del conocimiento del sistema. En todos los sistemas hay ciertos elementos (arcos en nuestro caso) que son claves para el comportamiento de conjunto. También el modelador conoce las funciones precio que introdujo para cada uno de los elementos, y cuales pueden ser más problemáticas para explorar los valores iniciales correspondientes a dichos arcos con más profundidad.

4.3.2. Las restricciones

En cuanto a las restricciones del problema, y únicamente por imperativo del algoritmo de resolución empleado, las únicas restricciones son las de continuidad en los nodos (propias de la red de flujo³) y las de capacidad de los arcos:

$$\begin{aligned} \mathbf{Ax} = \mathbf{b} & & \mathbf{A}(m \times n) \text{ y } \mathbf{b}(m) = b_1, b_2, \dots, b_m \\ l_i \leq x_i \leq u_i & & x_i = (x_1, x_2, \dots, x_n) \end{aligned} \quad (4.9)$$

Las restricciones utilizadas presentan dos limitaciones:

- no pueden representar adecuadamente restricciones no-lineales, que son las que se requieren para modelar procesos como la evaporación y la infiltración.
- no permiten la inclusión de otras restricciones lineales que no sean las propias de la red (sería deseable poder vincular dos variables de la forma $x_2 = 0, 4 \cdot x_1$).

Estas dos limitaciones se abordan mediante un sistema a sabiendas imperfecto: mediante ajustes iterativos de los límites de los arcos, que se explica en la sección 4.3.6.

³A: matriz de incidencia. Véase sección 2.2.2.

4.3.3. Minimizar la función objetivo

Como se vio en la sección 2.2.3, los algoritmos de optimización normalmente minimizan la función objetivo, en lugar de maximizarla, y el algoritmo empleado en este trabajo no es una excepción.

Para adaptarse a esta circunstancia, EcoGes internamente minimiza la sumatoria de los perjuicios, definiendo:

$$\text{Perjuicio neto} = C_{tte} - \text{Beneficio neto} \quad (4.10)$$

como muestra la Figura 4.9. Este cambio en la función objetivo lo realiza automáticamente el programa, sin intervención del usuario.

A continuación se clarifica el alcance del término *Beneficio neto* de la fórmula anterior.

Al pensar en un uso productivo del agua, por ejemplo el riego, existe la tendencia a confundir el *Beneficio neto* de la expresión de la Ecuación 4.10 con el beneficio de la mencionada actividad agrícola. Esto es un grave error, puesto que el beneficio de la actividad agrícola para producirse requiere la concurrencia de muchos factores: tierra, capital, trabajo, y también agua. El valor de la Ecuación 4.10 es el beneficio obtenido por la sociedad, o con más precisión, el *excedente* social de usar esa cantidad de agua en esa actividad (véase al respecto la sección 2.3.2). Por ello es preferible utilizar la palabra *excedente*, para evitar la posibilidad de confusiones.

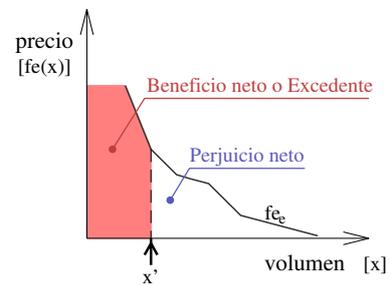


Figura 4.9: Función económica del elemento i y beneficio-perjuicio para un suministro x'_i .

El algoritmo LSNNO

Para la optimización se la función objetivo no lineal se eligió el algoritmo LSNNO, porque permite resolver problemas de gran tamaño, y porque el código fuente es de libre acceso, por lo que es fácilmente integrable en el resto del programa.

LSNNO [Toint y Tuyttens, 1992] [Toint y Tuyttens, 1990] permite resolver funciones objetivo no-lineales en redes puras. Hubiera sido deseable poder introducir restricciones adicionales al problema, pero el algoritmo utilizado no lo permite.

El problema que puede resolver es: **Minimizar** $f(\mathbf{x})$

Sujeto a: $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}$: condición de continuidad de la red de flujo.
 $\mathbf{l} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{u}$: capacidades de los arcos.

Siendo: $f(\mathbf{x})$ una función dos veces continuamente diferenciable en la región factible y parcialmente separable. Parcialmente separable significa que tiene una forma así: $f(x) = \sum_{s=1}^n f_s(x_s)$, donde x_s es un pequeño subconjunto de \mathbf{x} .

LSNNO es un algoritmo iterativo de búsqueda del mínimo, mediante técnicas del gradiente. A partir de un punto inicial se busca un nuevo punto factible en el cual la función objetivo (FO) disminuya. La dirección factible se determina construyendo un modelo local de la función de costo, mediante una aproximación cuadrática a la FO. Tiene un mecanismo para bloquear las variables que se encuentran cerca de los límites permitidos, y así se impide que se salgan de la región factible. Posteriormente, en la minimización de la función cuadrática antes mencionada, se realiza un cambio de variables para transformar el problema a una minimización no restringida que es más fácil de resolver.

En las fase de prueba del programa, se verificaron los resultados con los obtenidos con el conocido solver GAMS [Brooke et al., 1996].

4.3.4. La red de flujo para el problema no lineal

La red de flujo interna se construye “replicando” la red correspondiente a un periodo de tiempo, tantas veces como periodos se optimicen conjuntamente (llamado a veces horizonte de la optimización). En la Figura 4.10 se puede ver representados los arcos para 2 meses de un esquema simple.

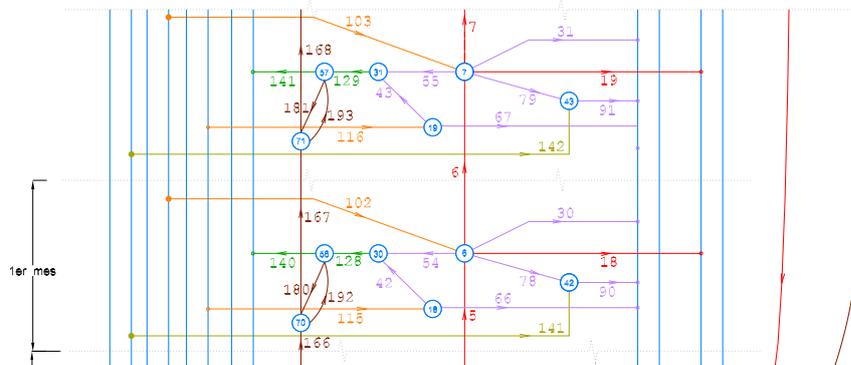


Figura 4.10: Red interna para un caso de ejemplo.

Los arcos verticales representan el volumen transferido de un mes al siguiente por los elementos que permiten almacenar agua, tales como embalses o acuíferos. Las líneas celestes a izquierda y derecha son nodos de la red, que se dibujan de forma rectangular para mayor claridad del dibujo.

Una consideración importante es la valoración del volumen transferido entre periodos de tiempo (arcos 5 a 7 y 166 a 168 en la figura anterior) en un modelo de optimización. A menos que medie alguna razón de peso, el flujo en estos arcos no debe de estar valorado. Si se valora se está primando (o priorizando) los usos futuros sobre los actuales, lo cual normalmente no puede justificarse ni es razonable.

Otra cuestión de interés para discutir es la condición de almacenamiento inicial y final en el sistema. En un modelo económico como éste, en que se valora el agua, el almacenamiento inicial constituye una reserva de “activos” en términos económicos que hay que valorar. Frente a esta cuestión hay dos opciones:

- a)- Exigir como condición que $V_{fin} = V_{ini}$, de forma que la satisfacción de los usos del sistema dependa sólo de las aportaciones consideradas en el período bajo análisis.
- b)- Permitir que $V_{fin} \neq V_{ini}$, que conlleva la necesidad de valorar el agua almacenada al inicio y al fin del periodo, para incorporar la diferencia de activos en el resultado económico. La valoración del agua para esta opción es particularmente difícil: el valor (marginal) está relacionado con la escasez, y por ello el valor del agua almacenada dependerá de la forma en que se operen los embalses y de la hidrología futura (desconocida), de forma que un valor “promedio” es poco adecuado para valorar el agua almacenada.

El segundo enfoque, si bien es más flexible, necesita del espinoso aspecto de valorar el almacenamiento. Por esto y por rigor conceptual, el autor de este trabajo prefiere la opción a). De todas formas hay que matizar esta opinión: en embalses que tengan tiempos de residencia chicos, el incumplimiento de la condición a) se estima que no será demasiado relevante. También podrían proponerse otras opciones, como establecer un valor mínimo de V_{fin} absoluto, o un porcentaje de V_{ini} , etc.

4.3.5. El punto inicial de la optimización

Para un problema de optimización no-lineal con un único mínimo global, en general, el vector nulo ($\mathbf{X} = \mathbf{0}$) no tiene por qué ser un punto factible del problema. Como se explicó en la sección 2.2.3, los algoritmos son procedimientos iterativos que requieren un punto inicial factible para comenzar la búsqueda del mínimo local.

Para conseguir un punto inicial razonablemente bueno, se ha construido *ad-hoc* un procedimiento iterativo lineal. La idea es representar a cada elemento que tenga una función económica no constante por dos arcos en paralelo (llamados *S: seguro* y *V: variable*) como muestra la Figura 4.11.

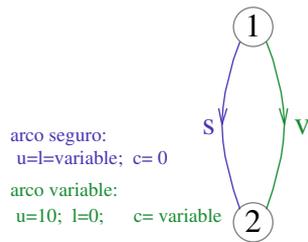


Figura 4.11: Esquema del mecanismo lineal con 2 arcos.

El valor de las propiedades u, l, c de estos arcos se modifican de iteración en iteración.

- Inicialmente se asignan los siguientes valores:
 - $l_s = u_s = 0, c_s = 0$
 - $l_v = 0, u_v = 10, c_v = fe_0$
- Sigüentes iteraciones:
 - $l_s = u_s = x_d, c_s = 0$
 - $l_v = 0, u_v = 10, c_v = fe_{x_v+x_s}$

El flujo que circula por el arco variable se va “asegurando” en cada iteración, al incrementar de 10 en 10 unidades los límites del arco seguro. El costo del arco variable se obtiene en cada iteración en función de la suma del circulante en ambos arcos. Repitiendo este procedimiento muchas veces se consigue un buen punto inicial.

4.3.6. El mecanismo iterativo

En las secciones anteriores se mencionó la necesidad de un mecanismo iterativo de ajuste, merced a las limitaciones del algoritmo para incluir restricciones adicionales a las propias de la red. Las restricciones que hay que representar son:

- la relación entre el volumen asignado a los usos y sus retornos.
- la relación entre el volumen almacenado en los embalses y el volumen evaporado.

El procedimiento es simple: consiste en resolver el problema y posteriormente realizar ajustes en la definición del problema en función de la solución anterior. Esta secuencia se muestra en el diagrama de flujo del programa, en la Figura 4.13 (sección 4.3.8).

Para ejemplificar el procedimiento, consideremos un retorno con *coeficiente de retorno*; α , siendo $\alpha \leq 1$:

1. Inicialmente se asume que el flujo de retorno es nulo: $u_{ret} = l_{ret} = 0$, y se optimiza el sistema.
2. Posteriormente se busca el arco correspondiente a la demanda, que tiene un flujo x_{dem} , y se modifica la condición anterior: $u_{ret} = l_{ret} = \alpha \cdot x_{dem}$ (lo que obliga a que $x_{ret} = \alpha \cdot x_{dem}$); y se vuelve a optimizar el sistema.
3. Se repite el paso 2, hasta verificar que las variaciones entre dos iteraciones sucesivas son menores que un error admitido previamente ε , o hasta alcanzar una cantidad máxima de iteraciones.

Es de rigor admitir que el uso de este procedimiento iterativo no obtendrá el mismo resultado que si se resuelve el problema con la inclusión explícita de las restricciones, como se muestra para un ejemplo simple en la sección 4.6.9. Si en el futuro se dispone de un algoritmo que permita incluir estas restricciones, puede mejorarse el programa.

También es importante comparar la efectividad del mecanismo iterativo para las distintas restricciones:

- Las restricciones de evaporación no suelen presentar demasiados problemas, porque normalmente el volumen evaporado es menor que un 3% del volumen almacenado en cada periodo, y esto hace que la convergencia de estos arcos sea rápida.
- Las restricciones de retornos, por el contrario, pueden ser un porcentaje alto del suministro a los usos; entonces la convergencia es más lenta, y también puede ser mayores las diferencias entre la solución exacta y la solución aproximada mediante el mecanismo de iteraciones, por lo que se recomienda verificar los criterios de convergencia siempre que se incluyan retornos.

4.3.7. Partición del periodo a optimizar

Cuando los problemas son de gran tamaño, aparece el problema del tiempo de cálculo, que crece de forma exponencial con la dimensionalidad del problema.

La forma usual de solventar este inconveniente es dividir el periodo total a optimizar en una cantidad entera de sub-periodos, optimizarlos de forma independiente y unir los resultados. Está claro que el resultado obtenido de esta forma es un subóptimo respecto del resultado de la optimización completa, a menos que se trate de una situación particular como la que se explica en el siguiente párrafo.

Puntos válidos de partición del periodo

Consideremos un esquema simple con un sólo embalse, como el de la Figura 2.2, optimizado para un periodo de 60 años (720 meses o periodos). La Figura 4.12 muestra los valores de volumen embalsado.

La única forma de conseguir el valor óptimo mediante la optimización “a trozos”, es dividir el periodo de análisis en las marcas con trazo grueso (que aparecen cuando se alcanza en V_{min}), que corresponden a estados en los cuales el sistema “pierde la memoria” de lo sucedido anteriormente.

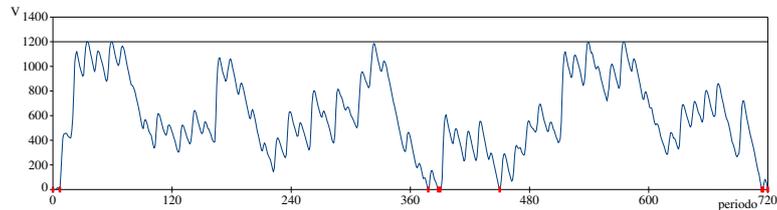


Figura 4.12: Puntos correctos para subdividir un horizonte temporal de optimización.

Es obvio que estos puntos de corte válidos (separados aleatoriamente, y desconocidos a priori) sólo existen para sistemas simples. Si pensamos en un sistema con decenas de embalses y acuíferos, es casi seguro que no existirá ningún punto de corte válido. Sin embargo, una conclusión conceptual es que estos puntos serán más frecuentes cuanto menor sea la capacidad de almacenamiento del sistema, y con ello menores los errores entre optimizar el periodo completo u optimizarlo dividido en varios sub-periodos.

Un problema que presenta esta optimización “a trozos” es que los resultados de la parte final de cada sub-periodo estarán distorsionados debido a la condición $V_{ini} = V_{fin}$ que se introduce sin querer en cada división del periodo total. Una idea interesante [Díaz y Brown, 1999] que no se ha incorporado a EcoGes, es solapar una cierta cantidad de años los sub-periodos, para así disminuir el efecto del problema mencionado.

Para finalizar, sólo resta decir que es elección del usuario optimizar el periodo completo y tardar más tiempo; o dividirlo en sub-periodos para conseguir menores tiempos de cálculo, con cierta pérdida de calidad en los resultados.

4.3.8. El diagrama de flujo de EcoGes

El programa EcoGes está escrito en lenguaje Fortran 90. La Figura 4.13 muestra el diagrama de flujo del programa.

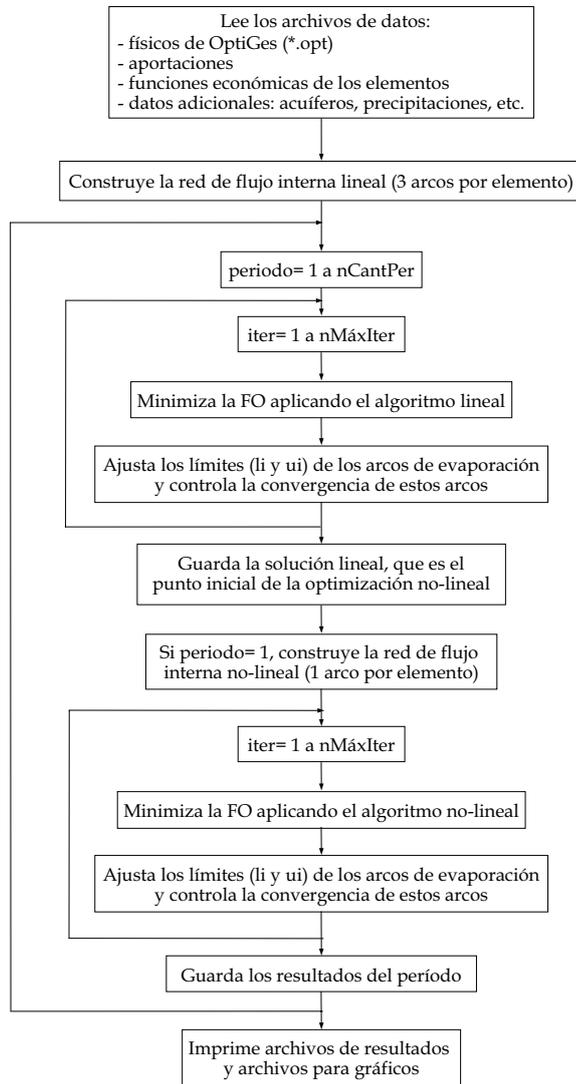


Figura 4.13: Diagrama de flujo del programa EcoGes.

En los apartados siguientes se describen las características de cada uno de los procedimientos.

4.4. Capacidades adicionales

Las capacidades descritas en esta sección no constituyen la innovación central de EcoGes, pero complementan las posibilidades de este modelo.

Una de ellas es la posibilidad de incluir acuíferos en la red a optimizar, de forma de que se consiga el uso eficiente y conjunto del agua superficial y subterránea. Son conocidas las ventajas obtenidas de la gestión coordinada de los recursos superficiales o subterráneos (o *uso conjunto*) [Sahuquillo Herráiz, 1985, Sahuquillo Herráiz, 1983], ya incrementa la disponibilidad total de recursos [Belaineh et al., 1999], y con ello el beneficio económico obtenido.

Otra ampliación es la incorporación de registros de precipitación para recortar el volumen demandado por ciertos usos.

4.4.1. Acuíferos en la red interna

Otra de las mejoras de EcoGes es la posibilidad de incluir acuíferos en el sistema a optimizar. Éstos se modelan introduciendo arcos en la red interna para representar el volumen almacenado en los acuíferos, tal como se hace para los embalses que almacenan agua en superficie.

Los arcos que corresponden a los acuíferos, y los que vinculan a éstos con el resto de los elementos del sistema varían según el tipo de acuífero, dentro de los 5 tipos admitidos en SimGes. Los arcos para cada tipo se muestran en la Figura 4.14.

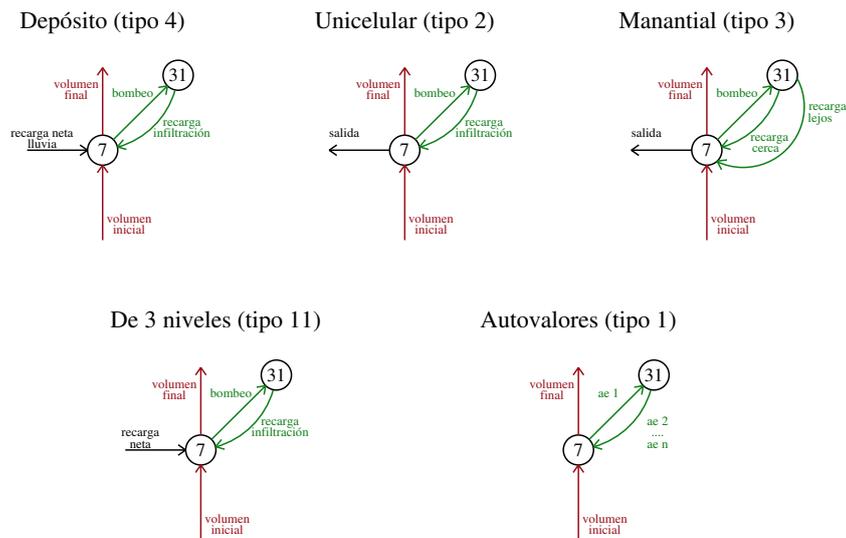


Figura 4.14: Acuíferos en la red interna no lineal.

Para incluir acuíferos en el esquema se ha de construir el archivo de datos adicionales (ver el Apéndice C.4), en el cual los datos se organizan de forma similar a los datos de acuíferos en el archivo de datos físicos de SimGes.

Acuífero modelado con ModFlow

La modelación de un acuífero de forma distribuida en el SSD Aquatool se hace con el método de los autovalores [Sahuquillo, 1983, Andreu, 1984]. Sin entrar con profundidad en este método de modelación, una de las ventajas que lo hacen especialmente conveniente para su inclusión dentro de modelos de gestión de SRH es considerar que solo hay unas pocas “formas” (denominadas *acciones elementales*) en que las acciones exteriores se aplican sobre el acuífero, pudiendo variar su intensidad en los distintos periodos de tiempo [Andreu y Sahuquillo Herráiz, 1987].

Esta misma idea se usa para modelar un acuífero mediante el conocido modelo ModFlow [McDonald y Harbaugh, 1988], permitiendo al usuario definir una pequeña cantidad de acciones elementales. La red interna contiene un arco por cada acción elemental. Una vez que se ha optimizado el sistema asumiendo que se puede extraer el agua del acuífero, se ejecuta una versión de ModFlow compilada *ad-hoc* para obtener la evolución temporal del acuífero con las extracciones y recargas realizadas.

Para reforzar lo dicho, en este caso el acuífero no se modela simultáneamente con el sistema superficial, sino que la modelación es secuencial, o derivada del modelo del sistema superficial. Los vínculos entre ambos modelos dependen de los arcos que unan los elementos de ambos sistemas.

Esta utilidad permite la simulación de acuíferos libres, que por su comportamiento no lineal no pueden modelarse mediante autovalores. También permite la inclusión directa de acuíferos ya calibrados en ModFlow dentro de EcoGes.

4.4.2. Precipitación para disminuir los usos agrícolas

Esta es una sencilla utilidad pensada para los usos agrícolas, que permite asociar a cada demanda datos históricos de precipitaciones mensuales, representativos de la zona. Este archivo de precipitaciones se describe en el Apéndice C.5.

En el archivo de datos adicionales se podrá incluir para cada demanda un valor de la superficie (en *ha*) por la cual se han de multiplicar (en cada mes) los valores de precipitación del archivo para obtener el volumen de agua precipitado, a descontar del volumen inicialmente requerido. Si el volumen a descontar es mayor que la demanda inicial, ésta se asume nula para dicho mes. Si no se quiere usar esta opción, se especifica una superficie nula para la demanda.

Evidentemente el uso de esta capacidad es opcional, y deberá estar en correspondencia con la forma en la que fue estimado el volumen requerido mensualmente en los usos agrícolas. Si ya se ha tenido en cuenta, utilizar este mecanismo sería equivocado.

El empleo de esta utilidad está pensado para poder contemplar la variabilidad de la demanda, así como se contempla la variabilidad de la oferta con las aportaciones. Ciertamente la variabilidad de los requerimientos es menor, pero considerando un valor medio en ciertas ocasiones se puede quedar del lado inseguro.

4.5. Uso del programa EcoGes

A continuación se explican los pasos para la utilización del modelo EcoGes.

1. El primer paso es la construcción del esquema del SRH con la interfaz gráfica OptiWin, que muestra la Figura 4.15. Los acuíferos no se pueden representar gráficamente porque OptiWin no admite estos elementos.

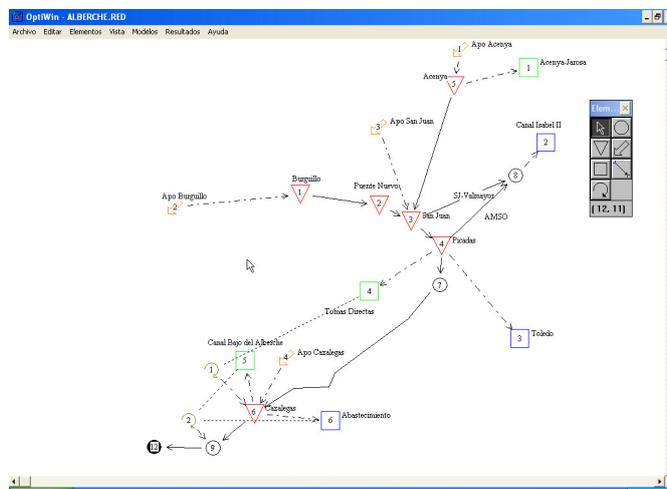


Figura 4.15: Interfaz de OptiWin, del SSD Aqutool.

Una vez finalizado el esquema se debe crear el archivo `DATGEN.opt`, en el menú `Modelos + Crear archivos de OptiGes`.

2. Posteriormente se han de construir los archivos de datos económicos y de datos adicionales (opcional), con los formatos descritos en el Anexo C.
3. Luego se ejecuta el modelo `EcoGes.exe` desde el explorador de Windows.
4. Finalmente los resultados se escriben en archivos de texto que se pueden abrir con Excel u otros programas similares.

4.6. Análisis de casos simples con EcoGes

A continuación se presentan una serie de casos de ejemplo que son lo suficientemente simples como para permitir:

- mostrar las relaciones cualitativas en la optimización económica (mecanismo de mercado).
- comprender el funcionamiento del modelo EcoGes.
- explorar el tipo de resultados que se pueden obtener del uso de este modelo.

Por otro lado, también sirvieron para verificar el correcto funcionamiento del programa informático.

Los casos presentados son los siguientes:

- Caso A1: reparto de agua entre dos usos (un mes).
- Caso A2: reparto de agua entre dos usos (varios meses).
- Caso B1: efecto de un embalse en el sistema.
- Caso B2: efecto del tamaño del embalse.
- Caso B3: modificación estacional de una curva de demanda.
- Caso B4: optimización sobre muchos años, variación del precio de equilibrio.
- Caso C1: incorporación de un nuevo uso al sistema.
- Caso D1: transferencia exterior (trasvase) de agua.
- Caso E1: efecto de los retornos.
- Caso G1: inclusión de un acuífero simple.
- Caso H2: usos en serie en un sistema.
- Caso J1: incorporación de la variabilidad hidrológica en un tratamiento probabilístico con múltiples series.

4.6.1. Caso A1

Este caso consiste en resolver la asignación del agua disponible entre dos usos para un único periodo de tiempo en el esquema de la Figura 4.16.

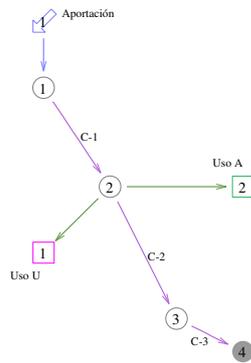


Figura 4.16: Esquema del Caso A1.

Características:

- la conducción $C-2$ tiene un valor mínimo de 10 unidades.
- los únicos elementos que contribuyen a la función objetivo son los dos usos: $Uso U$ y $Uso A$. Los demás elementos tienen beneficio nulo.
- las ecuaciones de las curvas de demanda o de disposición a pagar del $Uso U$ y del $Uso A$ son:

$$p_A = a_A + b_A \cdot x_A = 50 - 1,0 \cdot x_A$$

$$p_U = a_U + b_U \cdot x_U = 90 - 5,0 \cdot x_U$$

Se quiere encontrar las cantidades (x_U y x_A) a asignar a cada uso, de forma de maximizar los beneficios totales.

Obtención de las curvas de perjuicio

Como se usa un algoritmo de minimización, para resolver el problema se ha de transformar el problema anterior de maximización en una búsqueda de un mínimo.

Conociendo la curva de demanda de cada uso (Figura 4.17, A), el beneficio conseguido al suministrar cierta cantidad de agua a cada uso es el área bajo la curva de demanda. Así, la integral de las rectas da lugar a las parábolas (Figura 4.17, B). Evidentemente el máximo beneficio se alcanza para la cantidad correspondiente a precio (o marginal nulo) nulo.

Posteriormente, las curvas de perjuicio a utilizar se obtienen restando a una constante muy grande (por ejemplo 10.000) a las curvas de beneficio anteriores (Figura 4.17, C).

Así el problema de conseguir el máximo beneficio se ha transformado en obtener el mínimo perjuicio.

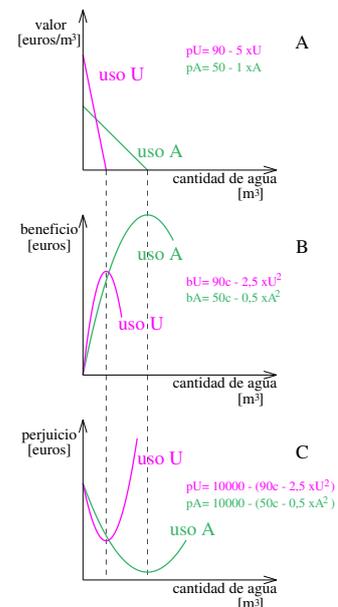


Figura 4.17: Curvas de demanda de los distintos.

Resultados

El resultado de este problema se muestra en el Cuadro 4.1.

mes	Aport.	C-1	C-3 y C-2	Uso U	Uso A	v. marg. nudo 2	perjuicio
1	39,0	39,0	10,0	11,5	17,5	32,50	18.574

Cuadro 4.1: Resultados del Caso A1.

Solución analítica

Puesto que en este caso sólo hay 2 incógnitas, el problema se puede resolver también de forma analítica:

$$\text{Min FO} = \text{Min} \{10000 - (a_U \cdot x_U - 0,5 \cdot b_U \cdot x_U^2) + 10000 - (a_A \cdot x_A - 0,5 \cdot b_A \cdot x_A^2)\}$$

$$\text{sujeito a: } x_U + x_A + x_{C-2} = 39$$

$$\text{dado que } x_{C-2} = x_{C-3} \geq 10, \quad \Rightarrow \quad x_U = (29 - x_A) \quad \text{y entonces:}$$

$$\text{Min FO} = \text{Min} \{10000 - (a_U \cdot (29 - x_A) - 0,5 \cdot b_U \cdot (29 - x_A)^2) + 10000 - (a_A \cdot x_A - 0,5 \cdot b_A \cdot x_A^2)\}$$

$$\text{Min FO} = \text{Min} \{20000 - 29 \cdot a_U + a_U \cdot x_A + 0,5 \cdot b_U \cdot (841 - 58 \cdot x_A + x_A^2) - a_A \cdot x_A + 0,5 \cdot b_A \cdot x_A^2\}$$

$$\text{Min FO} = \text{Min} \{(19159 - 29 \cdot a_U + 420,5 \cdot b_U) + (a_U - 29 \cdot b_U - a_A) \cdot x_A + 0,5 \cdot (b_U + b_A) \cdot x_A^2\}$$

$$\text{derivando e igualando a cero: } \Rightarrow \quad 0 = (a_U - 29 \cdot b_U - a_A) + (b_U + b_A) \cdot x_A$$

$$x_A = (a_U - 29 \cdot b_U - a_A) / (b_U + b_A) \tag{4.11}$$

$$x_U = (29 - x_A)$$

reemplazando los coeficientes por su valor numérico se obtiene:

$$x_A = 17,50 \quad (p_A = 32,50)$$

$$x_U = 11,50 \quad (p_U = 32,50)$$

En el punto óptimo, los valores marginales (o precios) son iguales.

El valor marginal del agua obtenido en el nudo 2 es el costo de oportunidad del recurso en ese momento y lugar. Si por algún método apareciera una unidad más de agua en el nudo 2, los dos usos estaría dispuesto a pagar 32,5 unidades monetarias por disponer de una fracción ese agua adicional.

Solución gráfica

La secuencia del procedimiento se observa en los gráficos A, B, C y D de la Figura 4.18.

Dado que $x_U + x_A = 29$, se invierte el sentido del eje x de la curva de demanda del *Uso A*, y el origen de este eje se sitúa en $x = 29$ del eje x original. Cualquier punto que se elija en el intervalo $[0 - 29]$ es una posible asignación de agua entre *Uso U* y *Uso A*.

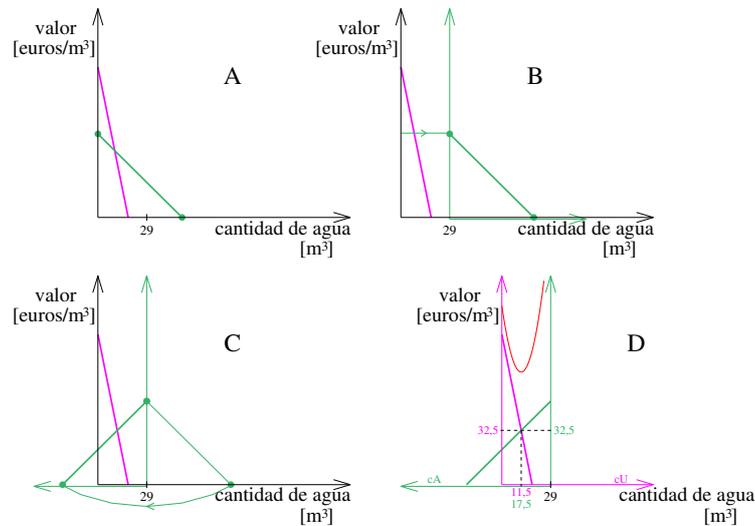


Figura 4.18: Obtención gráfica de la asignación por igualdad del valor marginal.

El gráfico D confirma que el punto óptimo se da cuando los valores marginales (o precios) son iguales para ambos usos, puesto que el mínimo de la parábola de perjuicio coincide con el punto donde se cortan las dos curvas de demanda, que corresponde a los valores de asignación hallados anteriormente.

Variante del caso A1: costo de tratamiento

Se supone un pequeño cambio en las condiciones del Caso A1: el *Uso U* conserva la curva de demanda, pero se agrega a la toma un costo, que podría representar por ejemplo costos de potabilización necesarios para poder usar el agua: $costo_{t\ Uso A} = 10$. En cambio la calidad natural es apta para el *Uso A* sin tratamiento.

El costo en la toma y el beneficio en uso se pueden sumar, para facilitar su manejo y poder utilizar las ecuaciones anteriores. Entonces resulta: $p'_U = 80 - 5,0 \cdot x'_U$.

Reemplazando los nuevos valores numéricos en la Ecuación 4.11 se obtiene:

$$x_A = 19,17 \quad (p_A = 30,84) \qquad x'_U = 9,83 \quad (p'_U = 30,84)$$

Se observa que se redujo el volumen del *Uso U*, aumentó el volumen del *Uso A* y disminuyó el precio de equilibrio. El valor marginal del agua *cruda* es $vm_c = 30,84$, y el valor marginal del agua *tratada* $vm_t = 40,84$.

4.6.2. Caso A2

Este caso es igual al Caso A1, solamente que en lugar de resolver un solo período de tiempo **se resolvieron 12 periodos (meses)**. Los resultados se ven en el Cuadro 4.2 y en la Figura 4.19.

mes	aport.	C-1	C-2 y C-3	Uso U	Uso A	v.marg. nudo 2	perjuicio
1	39,0	39,0	10,0	11,5	17,5	32,50	18.574
2	94,0	94,0	26,0	18,0	50,0	0,00	17.940
3	62,0	62,0	10,0	15,3	36,7	13,33	18.047
4	43,0	43,0	10,0	12,2	20,8	29,17	18.450
5	44,0	44,0	10,0	12,3	21,7	28,33	18.422
6	25,0	25,0	10,0	9,2	5,8	44,17	19.110
7	122,0	122,0	54,0	18,0	50,0	0,00	17.940
8	756,0	756,0	688,0	18,0	50,0	0,00	17.940
9	395,0	395,0	327,0	18,0	50,0	0,00	17.940
10	233,0	233,0	165,0	18,0	50,0	0,00	17.940
11	27,0	27,0	10,0	9,5	7,5	42,50	19.024
12	13,0	13,0	10,0	3,0	0,0	75,00	19.753
suma	1.853,0	1.853,0	1.330,0	163,0	360,0		221.079

Cuadro 4.2: Resultados del Caso A2.

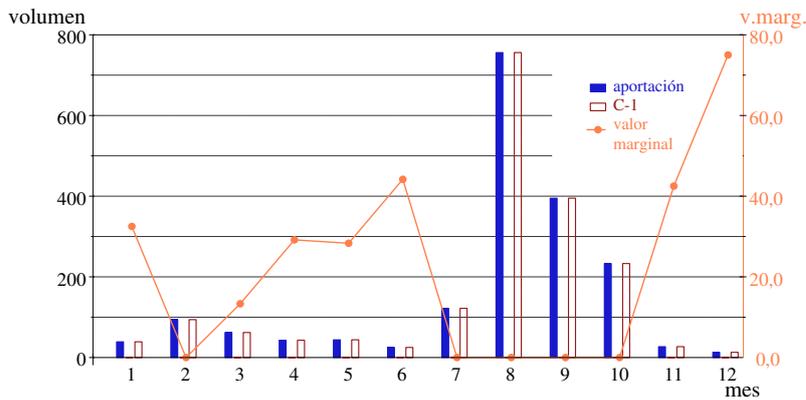


Figura 4.19: Resultados del Caso A2.

Análisis de los resultados:

1. En cada mes se reparte el volumen de la aportación ($c_{C-1} = c_{C-2} + c_U + c_A$).
2. Los meses en los que la aportación es mayor o igual a 78 (2, 7 a 10), el suministro a los usos *Uso U* y *Uso A* es el que corresponde al perjuicio mínimo (18 y 50 respectivamente). El excedente es evacuado al nudo final. En estos meses el valor marginal

es nulo, porque el agua adicional que pudiera aparecer en el nudo 2 sobraría (el vendedor de helados en la Antártida).

3. Los meses de menos disponibilidad, el agua tiene mayor valor marginal positivo. O sea que el valor marginal aumenta con la escasez.

Relación volumen disponible-valor marginal

Ahora se verá cómo se relaciona el volumen disponible con el valor marginal del agua en el nudo 2.

Si se suma horizontalmente las curvas de demanda del *Uso A* y del *Uso U*, y el volumen mínimo en la conducción *C-2* obtenemos la curva de demanda total en el nudo 2, que es la línea gruesa en la Figura 4.20.

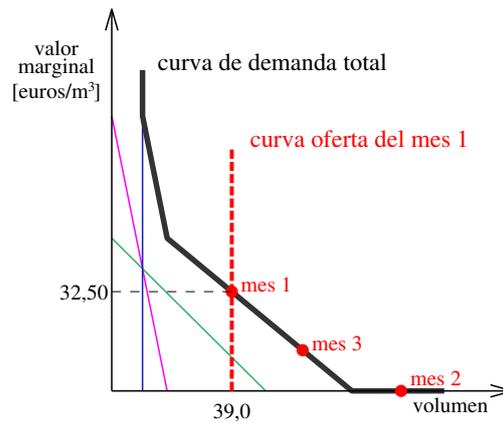


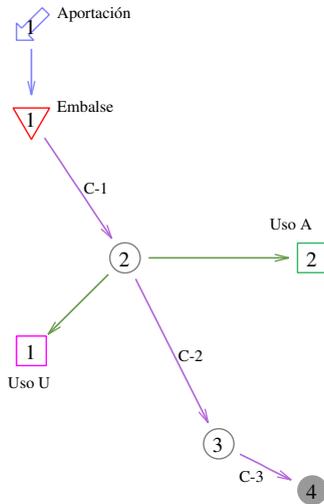
Figura 4.20: Valor marginal del agua en el nudo 2.

En el mismo gráfico se dibuja la curva de oferta (línea gruesa de trazos), que en cada mes es totalmente inelástica, puesto que la oferta depende de la naturaleza y no podemos hacer nada por incrementar una aportación. Esta curva de oferta es una línea vertical, que corta al eje x (cantidad) en el valor de la aportación del mes considerado.

Los pares cantidad-valor marginal en el nudo 2 estarán dados por la intersección de la curva de oferta (distinta en cada mes) y la curva de demanda (igual para todos los meses). Estos puntos de equilibrio para los meses 1, 2 y 3 se pueden observar en la Figura 4.20 antes mencionada.

4.6.3. Caso B1

Este caso es similar al Caso A2, pero se reemplazó el nudo 1 por un embalse, tal como muestra la Figura 4.21.



Características:

- se resuelve para 12 periodos de tiempo.
- el embalse tiene capacidad ilimitada, y $V_{fin} = V_{ini} = 0$.
- la conducción C-2 tiene un valor mínimo obligatorio de 10 unidades.
- los elementos que contribuyen a la función objetivo son *Uso A* y *Uso U*.
- las curvas de demanda de los usos son las mismas del Caso A1.

Figura 4.21: Esquema del Caso B1.

Los resultados se ven en el Cuadro 4.3 y en la Figura 4.22.

mes	Aportación	Embalse	C-1	C-3 y C-2	Uso U	Uso A	v.marg. nudo 2	perjuicio
1	39,0	0,0	39,0	10,0	11,5	17,5	32,50	18.574
2	94,0	40,0	53,6	10,0	13,9	29,7	20,33	18.188
3	62,0	48,0	53,6	10,0	13,9	29,7	20,33	18.188
4	43,0	37,0	53,6	10,0	13,9	29,7	20,33	18.188
5	44,0	29,0	53,6	10,0	13,9	29,7	20,33	18.188
6	25,0	0,0	53,6	10,0	13,9	29,7	20,33	18.188
7	122,0	0,0	122,0	54,0	18,0	50,0	0,00	17.940
8	756,0	0,0	756,0	688,0	18,0	50,0	0,00	17.940
9	395,0	0,0	395,0	327,0	18,0	50,0	0,00	17.940
10	233,0	116,0	117,0	49,0	18,0	50,0	0,00	17.940
11	27,0	65,0	78,0	10,0	18,0	50,0	0,00	17.940
12	13,0	0,0	78,0	10,0	18,0	50,0	0,00	17.940
suma	1.853,0		1.853,0	1.198,0	189,2	465,8		217.154

Cuadro 4.3: Resultados del Caso B1.

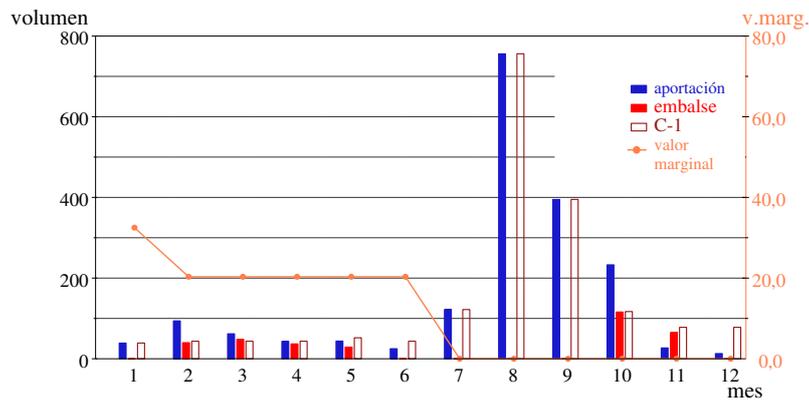


Figura 4.22: Resultados del Caso B1.

Análisis

1. Se pueden distinguir 3 grupos diferentes dentro de los 12 meses, delimitados por alguno de los estados absorbentes del embalse (lleno o vacío). En c/u de estos periodos, el agua tiene un valor marginal constante y distinto del valor marginal en otros períodos.

meses	valor marginal	c_U	c_A	$c_U + c_A$
1	32,50	11,5	17,5	29,0
2 a 6	20,33	13,9	29,7	43,6
7 a 12	0,00	18,0	50,0	68,0

2. Gracias a la existencia del embalse (comparando este caso con el Caso A2) el perjuicio disminuyó en 3925 unidades monetarias, pasando de 221.079 a 217.154. La capacidad de almacenamiento que debería ser de al menos 116 unidades para cumplir adecuadamente su misión (en el período analizado).
3. Para los períodos 7 al 10, en los que hay un exceso de agua, hay infinitas combinaciones de los valores de $c_{Embalse}$, c_{C-1} , c_{C-2} y c_{C-3} con las que se obtiene igual valor de la función objetivo (siempre que $c_{C-1} \geq 78$). En estos meses el problema planteado tiene múltiples soluciones, todas igualmente buenas.
4. Recordando la Figura 4.20, de equilibrio entre oferta y demanda en el nudo 2, se concluye que el embalse consigue estabilizar o uniformizar la oferta de agua, aumentando la oferta mínima, y reduciendo las fluctuaciones del valor marginal (comparar la columna de C-1 en el Cuadro 4.2 y en el Cuadro 4.3).

4.6.4. Caso B2

Este caso es muy parecido al Caso B1: el esquema es el mismo, pero ahora el **Embalse tiene un volumen máximo** de 80 unidades, menor que las 116 que necesitaba según se vio en el Caso B1.

Características:

- se resuelve para 12 periodos de tiempo.
- el embalse tiene capacidad máxima de 80 unidades, y $V_{fin} = V_{ini} = 0$.
- la conducción C-2 tiene un valor mínimo de 10 unidades.
- los elementos que contribuyen a la función objetivo son *Uso A* y *Uso U*.
- las curvas de demanda de los usos son las mismas de antes.

Los resultados se ven en el Cuadro 4.4 y en la Figura 4.23.

mes	Aport.	Embalse	C-1	C-3 y C-2	Uso U	Uso A	v.marg. nudo 2	perjuicio
1	39,0	0,0	39,0	10,0	11,5	17,5	32,50	18.574
2	94,0	40,0	43,6	10,0	13,9	29,7	20,33	18.188
3	62,0	48,0	43,6	10,0	13,9	29,7	20,33	18.188
4	43,0	37,0	43,6	10,0	13,9	29,7	20,33	18.188
5	44,0	29,0	43,6	10,0	13,9	29,7	20,33	18.188
6	25,0	0,0	43,6	10,0	13,9	29,7	20,33	18.188
7	122,0	0,0	122,0	54,0	18,0	50,0	0,00	17.940
8	756,0	0,0	756,0	688,0	18,0	50,0	0,00	17.940
9	395,0	0,0	395,0	327,0	18,0	50,0	0,00	17.940
10	233,0	80,0	153,0	85,0	18,0	50,0	0,00	17.940
11	27,0	47,0	60,0	10,0	15,0	35,0	15,00	18.076
12	13,0	0,0	60,0	10,0	15,0	35,0	15,00	18.076
suma	1.853,0		1.853,0	1.234,0	183,2	435,9		217.426

Cuadro 4.4: Resultados del Caso B2.

Análisis

1. Las diferencias respecto al Caso B1 se encuentran sólo en los meses 11 y 12, en los cuales se asigna menos agua que antes. La limitación en la capacidad del embalse impide la satisfacción óptima de los usos, y por ello el valor marginal no es nulo como antes en dichos meses, y hay mayor perjuicio.
2. Comparando este caso con el Caso B1, se ve que los estados extremos del embalse (lleno o vacío) delimitan períodos de igual valor marginal del agua (meses 2 a 6, o 10 a 12). Cada uno de estos períodos podría optimizarse independientemente y sumarse, sin alterar el resultado.
3. Los meses consecutivos en los que la aportación excede de 78 unidades se abastecen completamente ambos usos, y el excedente circula por las conducciones C-2 y C-3.

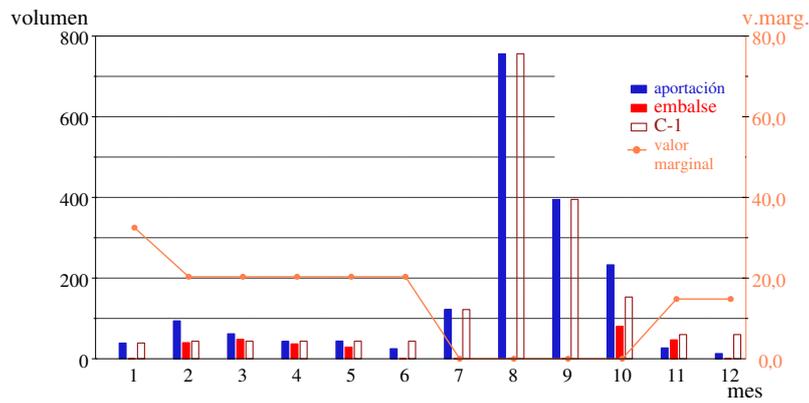


Figura 4.23: Resultados del Caso B2.

Distintas capacidades del embalse

Repetiendo este cálculo para distinta capacidad máxima del embalse, se obtienen los resultados del Cuadro 4.24 y la Figura 4.25.

V_{max}	Perj. Uso U	Perj. Uso A	Perj. Total
0	0	0	0
15	484	855	1.339
30	639	1.621	2.260
50	765	2.252	3.017
80	871	2.782	3.653
116	917	3.008	3.925

Figura 4.24: Perjuicios evitados con distintos tamaños de embalse.

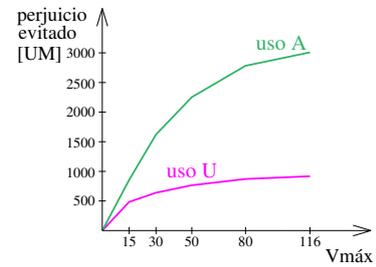


Figura 4.25: Perjuicios evitados con distintos tamaños de embalse.

Puede apreciarse con claridad que la relación entre el volumen máximo del embalse y los perjuicios en cada uso, y del perjuicio total es no lineal.

Conocer los perjuicios evitados para cada uso es un muy buen punto de partida para establecer un criterio de reparto de los costos de la presa, aunque posteriormente se matizara con otras consideraciones. El problema del reparto de los costos entre los usuarios de infraestructuras multipropósito es un tema clásico de la ingeniería hidráulica. En el ejemplo presentado se aprecia que para $V_{max} > 50$, el *uso U* tiene muy pocos beneficios adicionales, porque los perjuicios crecen muy lentamente. Por el contrario, el *uso A* reduce su perjuicio significativamente aún para capacidades mayores.

4.6.5. Caso B3

Este caso es muy parecido al Caso B1: el esquema es el mismo, pero ahora el **Uso A** tiene en los meses 4 y 5 una curva de demanda diferente.

Características:

- el embalse tiene capacidad ilimitada, y $V_{fin} = V_{ini} = 0$.
- la conducción C-2 tiene un valor mínimo de 10 unidad.
- los elementos que contribuyen a la función objetivo son *Uso A* y *Uso U*.
- las curvas de demanda de los usos son las mismas de antes, excepto en el *Uso A* para los meses 4 y 5, que tienen una curva con menos pendiente: $p_{A_{4,5}} = 50 - 0,5 \cdot c$ (Figura 4.26).

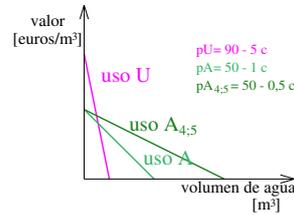


Figura 4.26: Curvas de demanda del Caso B3.

Los resultados se ven en el Cuadro 4.5.

mes	Aport.	Embalse	C-1	C-3 y C-2	Uso U	Uso A	v.marg.	perjuicio
1	39,0	0,0	39,0	10,0	11,5	17,5	32,50	18.574
2	94,0	49,3	44,7	10,0	12,4	22,2	27,75	18.402
3	62,0	66,6	44,7	10,0	12,4	22,2	27,75	18.402
4	43,0	42,6	66,9	10,0	12,4	44,5	27,75	17.537
5	44,0	19,7	66,9	10,0	12,4	44,5	27,75	17.537
6	25,0	0,0	44,7	10,0	12,4	22,2	27,75	18.402
7	122,0	0,0	122,0	54,0	18,0	50,0	0,00	17.940
8	756,0	0,0	756,0	688,0	18,0	50,0	0,00	17.940
9	395,0	0,0	395,0	327,0	18,0	50,0	0,00	17.940
10	233,0	116,0	117,0	49,0	18,0	50,0	0,00	17.940
11	27,0	65,0	78,0	10,0	18,0	50,0	0,00	17.940
12	13,0	0,0	78,0	10,0	18,0	50,0	0,00	17.940
suma	1.853,0		1.853,0	1.198,0	181,8	473,3		216.494

Cuadro 4.5: Resultados del Caso B3.

Análisis

1. Los resultados de interés son los de los meses 4 y 5. En estos meses el volumen asignado al *Uso A* es el doble del mes 3, debido a que la pendiente de la función precio es la mitad ($p_{A_4} = 0,5 \cdot p_{A_3}$). Entonces el óptimo se consigue para un valor marginal constante en el nudo 2, y por ende asignando más agua al *Uso A* en los meses 4 y 5.
2. En la columna de perjuicio, puede llamar la atención que en los meses 4 y 5 el perjuicio sea menor que en los meses 7 a 12. Esto es porque el perjuicio mínimo correspondiente al *Uso A* en los meses 4 y 5 es de 7500 unidades monetarias, mientras que para el resto de los meses es de 8750 unidades monetarias (porque el área bajo la curva de demanda de los meses 4 y 5 es mayor que el área bajo la curva de demanda de los otros meses, y dicha área representa los beneficios para el suministro máximo).

4.6.6. Caso B4

Este caso es muy parecido al Caso B2: el esquema es el mismo, pero ahora se resuelve con **una serie de aportaciones más larga** (60 años, 720 meses) que la serie del caso mencionado. La red de flujo correspondiente tiene casi 8000 arcos (variables de decisión) y 3600 nodos, y consecuentemente mayor tiempo de cálculo.

Este caso tiene por finalidad introducir la discusión del espinoso tema de derivar reglas de operación a partir de los resultados de la gestión óptima. La idea motivadora de estos “experimentos numéricos” fue la de explorar la posibilidad de establecer como regla de gestión del embalse un precio del agua, en función del almacenamiento.

Distintos V_{max}

Las Figuras 4.27 a 4.30 presentan la evolución del volumen embalsado (línea gruesa) y del precio de equilibrio (línea fina) para distintas capacidad máxima de almacenamiento del embalse (línea de trazos). La escala de los ejes es la misma en todas las figuras, para permitir la comparación visual.

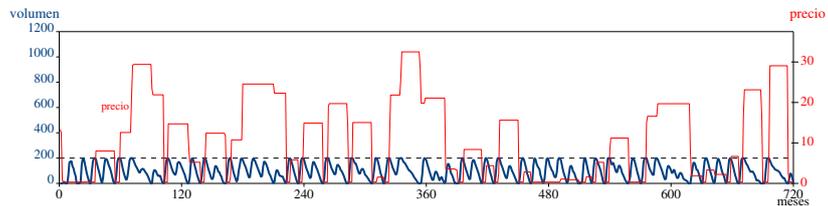


Figura 4.27: Volumen almacenado y precio, Caso B4, $V_{max} = 200 \text{ hm}^3$.

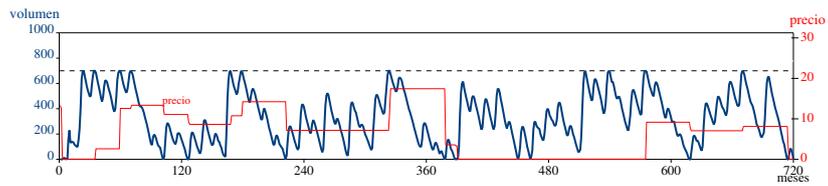


Figura 4.28: Volumen almacenado y precio, Caso B4, $V_{max} = 700 \text{ hm}^3$.

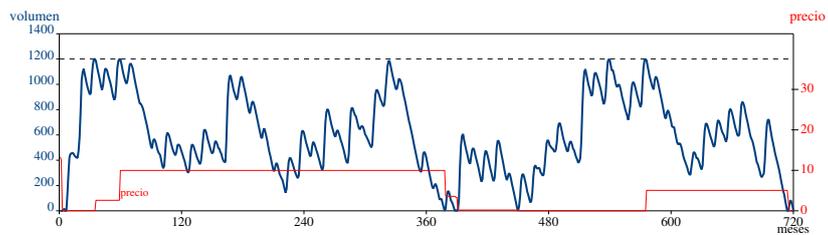


Figura 4.29: Volumen almacenado y precio, Caso B4, $V_{max} = 1200 \text{ hm}^3$.

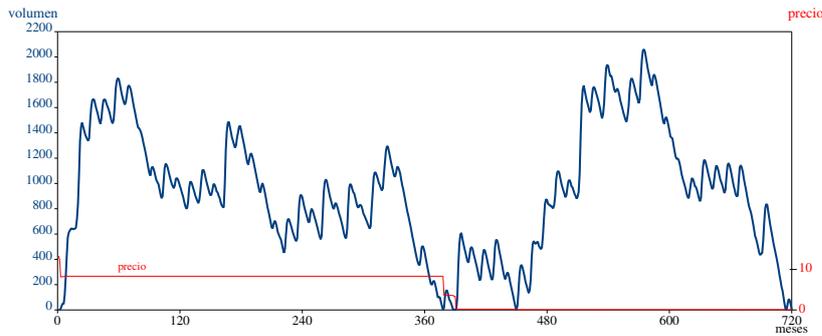


Figura 4.30: Volumen almacenado y precio, Caso B4, $V_{max} = 2500 \text{ hm}^3$

Como se mencionó en la sección 4.3.7, se aprecia que cuanto menor es la capacidad de almacenamiento, el estado $V = V_{min}$ o $V = V_{max}$ (que permite optimizar periodos independientemente y sumarlos), se repite con más frecuencia.

Precio de equilibrio y volumen almacenado

Una comparación interesante es la relación precio de equilibrio–volumen almacenado en los distintos intervalos de tiempo, que se puede ver en las Figuras 4.31 y 4.32.

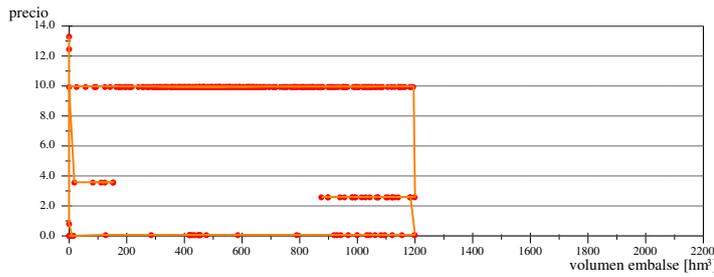


Figura 4.31: Evolución de precio con el volumen, Caso B4, $V_{max} = 1200 \text{ hm}^3$.

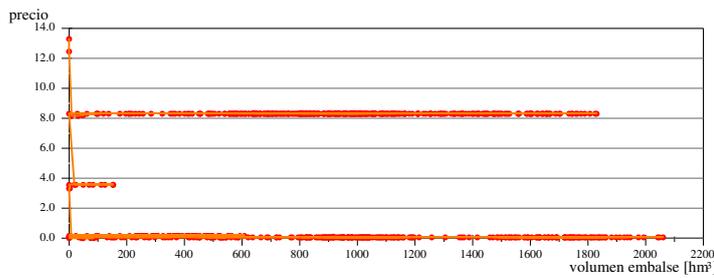


Figura 4.32: Evolución de precio con el volumen, Caso B4, $V_{max} = 2500 \text{ hm}^3$.

En esas figuras, la línea une puntos correspondientes a intervalos sucesivos; de forma que puede verse que el paso de un precio a otro se produce para embalse vacío o embalses llenos (recordar lo dicho en la sección 4.3.7). En cada precio el movimiento es “horizontal”, puesto que el precio se mantiene constante para valores de volumen muy distintos.

Variación del precio de equilibrio

Otra comparación interesante es la del precio de equilibrio alcanzado en cada periodo. La Figura 4.33 muestra la frecuencia con que se dan distintos precios en el caso de distintas capacidades de embalse.

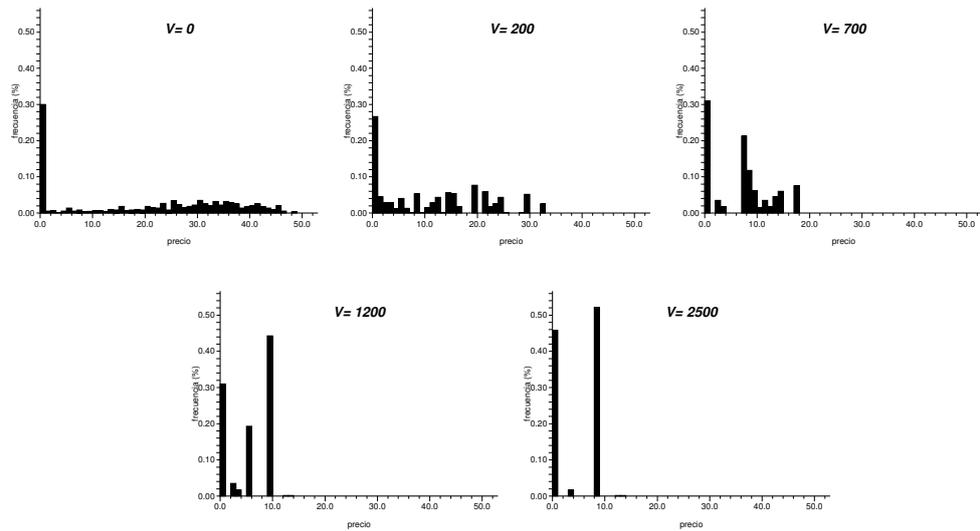


Figura 4.33: Histogramas de precios para distintas capacidad de embalse, Caso B4.

Queda patente que el aumento de la capacidad de almacenamiento consigue estabilizar el precio, a la vez que reducir el valor del precio medio.

La Figura 4.34, en la página siguiente, es similar a la figura anterior, sólo que se dibujaron en el mismo gráfico los histogramas acumulados, y la curva de duración de caudales (en línea de puntos).

En el histograma acumulado correspondiente a $V = 0$ (rojo), el precio de equilibrio nulo corresponde al valor de 78 unidades de volumen en la curva de duración de caudales, que es el valor que permite satisfacer completamente a todos los usos. Mayores caudales conducen a obtener igualmente un precio de equilibrio nulo.

A medida que se incrementa la capacidad de almacenamiento, el precio se estabiliza (permanece durante más tiempo con un mismo valor), y disminuye.

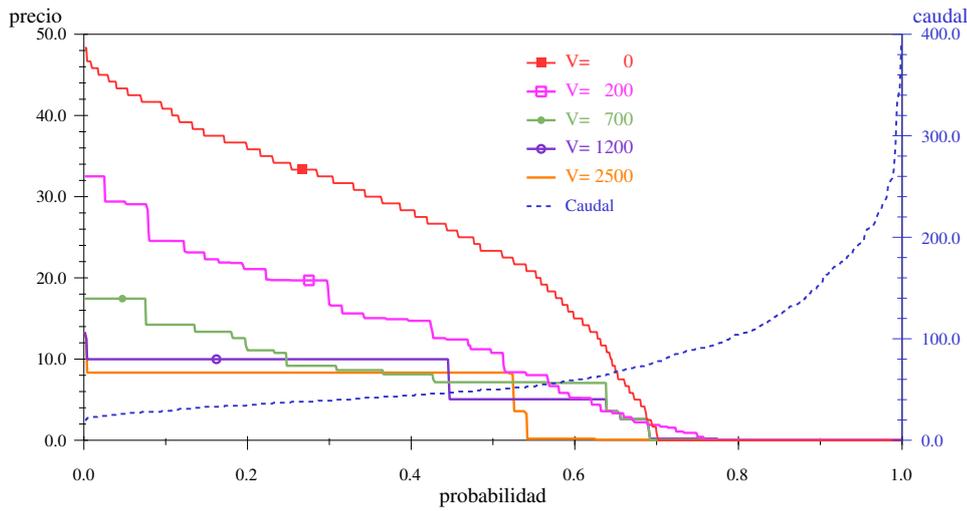


Figura 4.34: Histogramas acum. de precios para distinto V_{max} del embalse, Caso B4.

Si se comparan dos curvas sucesivas a y b (por ejemplo $V_a = V_0$ y $V_b = V_{200}$) se puede comprobar que el área en que $precio_b > precio_a$ es siempre menor que el área en que $precio_a > precio_b$, o sea que al aumentar el almacenamiento siempre mejoran los ingresos. Evidentemente, si se incluyeran costos de construcción el tamaño óptimo de la presa sería menor que el máximo.

El histograma acumulado correspondiente a $V_{max} = 2500$ (naranja) es el mejor posible de obtener con la aportación considerada, aunque eso, evidentemente, no implica que el valor del recurso sea siempre nulo (ver Figura 4.30).

Cuestiones prácticas

A continuación se ejemplifica un problema que puede presentarse con los algoritmos iterativos: que llegado a un cierto número de iteraciones el algoritmo se detenga en un punto lejano al punto óptimo.

En la Figura 4.35 la línea verde representa el volumen circulante en $C-3$ (dibujada en otra escala). Por un razonamiento lógico, los meses en que $V_{C-3} > 10$, el precio o valor marginal del recurso ha de ser nulo. Puede observarse que para dos grupos, a pesar de realizar una cantidad elevada de iteraciones, no se consigue una convergencia aceptable. Esto indica que la revisión de resultados con ojo crítico es una parte fundamental del análisis.

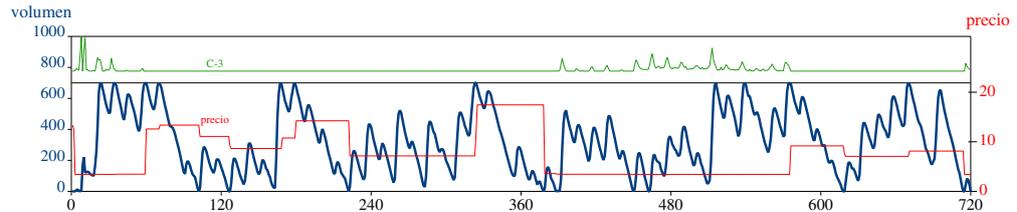


Figura 4.35: Volumen almacenado, Caso B4, $V_{max} = 700$, con menos iteraciones.

Aumentando la cantidad de iteraciones se obtiene otro resultado más cerca del óptimo, que muestra la Figura 4.36. Este resultado corresponde a la detención del algoritmo porque la disminución del valor de la función objetivo entre iteraciones sucesivas era menor que un valor de tolerancia admitido. Sin embargo esto no implica que los valores de las variables (el vector \mathbf{x}) no cambie entre dichas iteraciones.

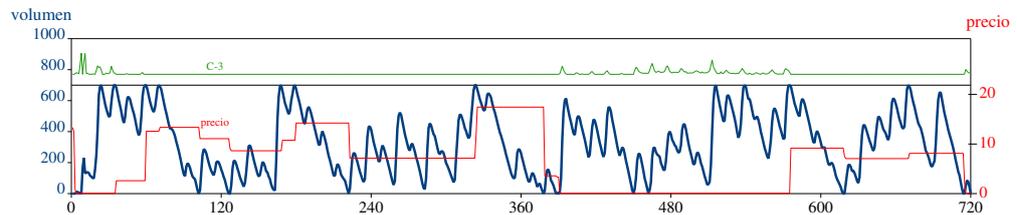
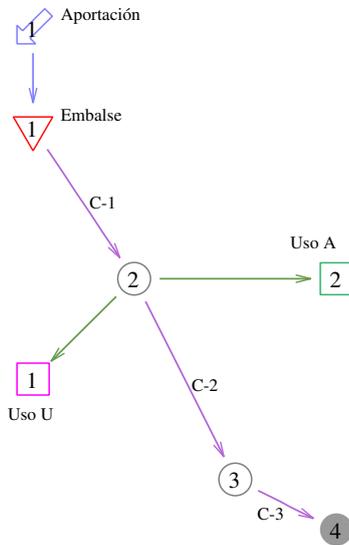


Figura 4.36: Volumen almacenado, Caso B4, $V_{max} = 700$, con más iteraciones.

Como comentario colateral, en este experimento la tasa de convergencia más lenta (y por lo tanto la necesidad de más iteraciones) se tuvo para $V_{max} = 700$, mientras que los valores más extremos de volumen convergen más rápido.

4.6.7. Caso C1

El esquema (Figura 4.37) es el mismo del Caso B1, pero ahora **se valora un uso en la conducción C-3** (un uso en el cauce, por ejemplo el uso para transporte fluvial), y por lo tanto este elemento tiene una curva de demanda asociada.



Características:

- el embalse tiene capacidad máxima ilimitada, y $V_{fin} = V_{ini} = 0$.
- la conducción C-2 tiene un mínimo de 10 unid.
- la conducción C-3 tiene una curva de demanda $p_{C-3} = 40 - 0,15 \cdot c$. Esta y las anteriores curvas de demanda se observan en la Figura 4.38.
- los elementos que contribuyen a la función objetivo son: *Uso U*, *Uso A* y *C-3*.

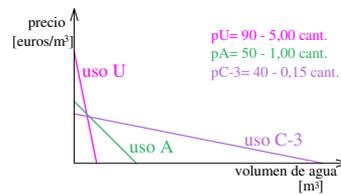


Figura 4.37: Esquema del Caso C1.

Figura 4.38: Curvas de demandas del Caso C1.

Los resultados se ven en el Cuadro 4.6 y en la Figura 4.39.

mes	Aport.	Embalse	C-1	C-2 y C-3	Uso U	Uso A	v.marg. nudo 2	perjuicio
1	39,0	0,0	39,0	16,1	10,5	12,4	37,58	28.162
2	94,0	40,4	53,6	28,5	10,8	14,3	35,73	27.628
3	62,0	48,8	53,6	28,5	10,8	14,3	35,73	27.628
4	43,0	38,2	53,6	28,5	10,8	14,3	35,73	27.628
5	44,0	28,6	53,6	28,5	10,8	14,3	35,73	27.628
6	25,0	0,0	53,6	28,5	10,8	14,3	35,73	27.628
7	122,0	0,0	122,0	86,4	12,6	23,0	27,03	25.481
8	756,0	471,2	284,8	224,4	16,7	43,7	6,34	22.765
9	395,0	581,8	284,8	224,4	16,7	43,7	6,34	22.765
10	233,0	529,6	284,8	224,4	16,7	43,7	6,34	22.765
11	27,0	271,8	284,8	224,4	16,7	43,7	6,34	22.765
12	13,0	0,0	284,8	224,4	16,7	43,7	6,34	22.765
suma	1.853,0		1.853,0	1.366,9	161,0	325,0		305.608

Cuadro 4.6: Resultados del Caso C1.

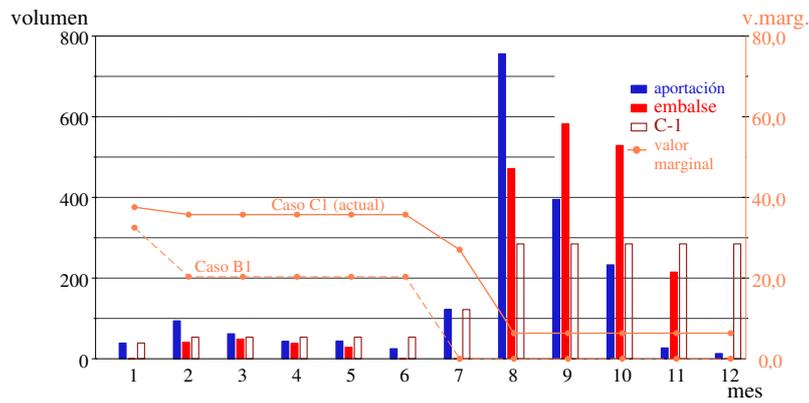


Figura 4.39: Resultados del Caso C1.

Análisis

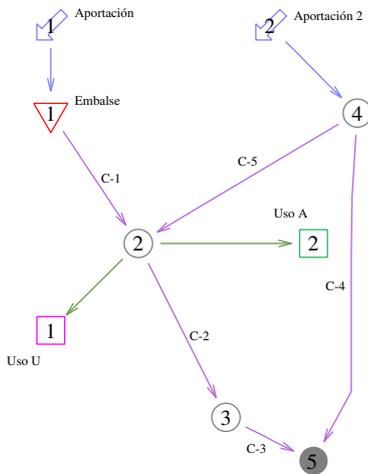
1. La magnitud de los perjuicios es mayor que en los casos anteriores porque se ha agregado un término más, correspondiente a la conducción *C-3*. Con estos datos, el perjuicio mínimo en un mes es de 22.607, mientras que en Caso B1 y Caso B2 el perjuicio mínimo en un mes era de 17.940. Simplemente ha cambiado el valor de referencia debido a la nueva valoración de *C-3*.
2. Comparando los valores del mes 7, se ve que ahora no se puede abastecer hasta los niveles de perjuicio mínimo los usos *Uso U* y *Uso A*, debido a que el uso en *C-3* tiene su peso e interviene en el reparto del volumen disponible.
3. Observando la Figura 4.39, se ve que el efecto de introducir la valoración en el elemento *C-3* es el de incrementar el valor marginal en el nudo 2 en todos los meses, y a consecuencia de ello, reducir la asignación a los usos preexistentes para adaptarse a la nueva circunstancia.
4. Al comparar los valores de *C-3* en este caso y en el Caso B2 para los meses 8 a 12, se ve que al ponerle una curva de demanda a la conducción *C-3*, en todos los meses circula la misma cantidad de agua. Debido a que el embalse permite almacenar agua, el uso en un mes está en competencia con el mismo uso en los meses siguientes, y por ello el mínimo perjuicio se consigue con un reparto uniforme del agua, puesto que en todos los meses ese uso tiene la misma curva de demanda.
5. Los valores que hacen nulo el valor marginal para cada elemento son:

elemento	flujo para v.marg.= 0
<i>Uso A</i>	50,0
<i>Uso U</i>	18,0
<i>C-3</i>	266,7

El reparto óptimo tiende a asignar a cada elemento con peso en la función objetivo valores lo más cercanos posible a los valores de la tabla, tanto si hay escasez como si hay abundancia.

4.6.8. Caso D1

A partir del Caso B1, se agregó un trasvase (C-5) desde un río próximo al nudo 2. El nuevo esquema es el de la Figura 4.40. Se quiere estudiar el efecto del trasvase.



Características:

- se resuelve para 12 periodos de tiempo.
- el embalse tiene capacidad máxima ilimitada, y $V_{fin} = V_{ini} = 0$.
- la conducción C-2 tiene un mínimo de 10.
- los elementos que contribuyen a la función objetivo son: *Uso U*, *Uso A* y C-3; y las curvas de demanda son las mismas del Caso C1 (Figura 4.38).
- la *Aportación 2* es igual a *Aportación*.
- la conducción C-5 tiene un máximo de 50 unidades en cada periodo, y no tiene asociado ninguna función de costo o beneficio.

Figura 4.40: Esquema del Caso D1.

Los resultados se ven en el Cuadro 4.7 y en la Figura 4.41.

mes	Aport. y Aport. 2	Embalse	C-1	C-2 y C-3	C-5	Uso U	Uso A	v.marg. nudo 2	perjuicio
1	39,0	0,0	39,0	49,2	39,0	11,5	17,4	32,63	26.793
2	94,0	48,0	46,0	64,4	50,0	11,9	19,7	30,34	26.227
3	62,0	64,0	46,0	64,4	50,0	11,9	19,7	30,34	26.227
4	43,0	54,0	53,0	64,4	43,0	11,9	19,7	30,34	26.227
5	44,0	46,0	52,0	64,4	44,0	11,9	19,7	30,34	26.227
6	25,0	0,0	71,0	64,4	25,0	11,9	19,7	30,34	26.227
7	122,0	0,0	122,0	128,8	50,0	13,9	29,3	20,68	24.289
8	756,0	483,2	272,8	256,6	50,0	17,7	48,5	1,51	22.615
9	395,0	605,4	272,8	256,6	50,0	17,7	48,5	1,51	22.615
10	233,0	565,6	272,8	256,6	50,0	17,7	48,5	1,51	22.615
11	27,0	296,8	295,8	256,6	27,0	17,7	48,5	1,51	22.615
12	13,0	0,0	309,8	256,6	13,0	17,7	48,5	1,51	22.615
suma	1.853,0		1.853,0	1.783,1	491,0	173,5	387,4		295.292

Cuadro 4.7: Resultados del Caso D1.

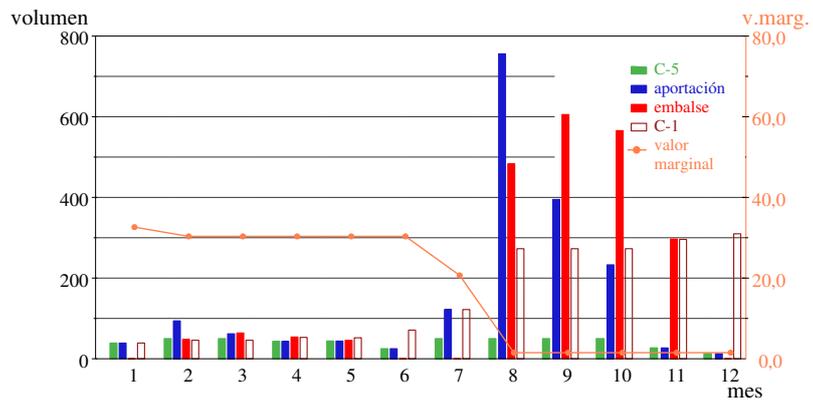


Figura 4.41: Resultados del Caso D1.

Análisis

1. El efecto del trasvase es disminuir el valor marginal del agua en el nudo 2, gracias a un aumento de la oferta, lo que permite aumentar el suministro a todos los usos.
2. Evidentemente, el perjuicio total disminuye comparando con el Caso C1 en alrededor de 10.000 unidades monetarias, gracias a las 491 unidades de agua trasvasadas.
3. La transferencia de recursos (agua), al estar valorada económicamente, es una transferencia de dinero.

4.6.9. Caso E1

A partir del Caso D1, se agregó un retorno del *Uso U* al nudo 3. Puede imaginarse que representa un cambio en la forma de utilizar el agua que disminuye el consumo. El nuevo esquema es el de la Figura 4.42.

Características:

- el embalse tiene capacidad máxima ilimitada, y $V_{fin} = V_{ini} = 0$.
- la conducción C-2 tiene un mínimo de 10 unidades.
- los elementos que contribuyen a la función objetivo son: *Uso U*, *Uso A* y C-3, y las curvas de demanda son las de la Figura 4.38.
- la *Aportación 2* es igual a *Aportación*.
- la conducción C-5 tiene un máximo de 50 unidades en cada periodo.
- el coeficiente de retorno es 0,5.

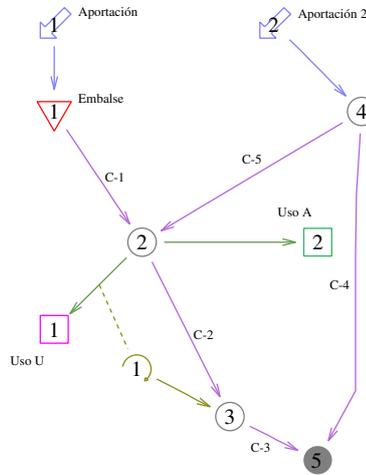


Figura 4.42: Esquema del Caso E1.

Los resultados se ven en el Cuadro 4.8.

mes	Aport. y Aport. 2	Embalse	C-1	C-2	C-3	C-5	Uso U	Uso A	v.marg. nudo 2	Ret.
1	39,0	0,0	39,0	48,2	54,1	39,0	11,6	18,1	31,88	5,8
2	94,0	48,0	46,0	63,5	69,5	50,0	12,1	20,4	29,57	6,0
3	62,0	64,0	46,0	63,5	69,5	50,0	12,1	20,4	29,57	6,0
4	43,0	54,0	53,0	63,5	69,5	43,0	12,1	20,4	29,57	6,0
5	44,0	46,0	52,0	63,5	69,5	44,0	12,1	20,4	29,57	6,0
6	25,0	0,0	71,0	63,5	69,5	25,0	12,1	20,4	19,77	6,0
7	122,0	0,0	122,0	127,7	134,7	50,0	14,0	30,2	0,36	7,0
8	756,0	483,2	272,8	255,2	264,2	50,0	17,9	49,6	0,36	9,0
9	395,0	605,4	272,8	255,2	264,2	50,0	17,9	49,6	0,36	9,0
10	233,0	565,6	272,8	255,2	264,2	50,0	17,9	49,6	0,36	9,0
11	27,0	296,8	295,8	255,2	264,2	27,0	17,9	49,6	0,36	9,0
12	13,0	0,0	309,8	255,2	264,2	13,0	17,9	49,6	0,36	9,0
suma	1.853,0		1.853,0	1769,5	1.857,5	491,0	175,7	398,7		88,0

Cuadro 4.8: Resultados del Caso E1.

Análisis

1. Nuevamente los perjuicios totales disminuyen: el retorno tiene un efecto beneficioso, porque permite disponer de más agua que antes para el uso C-3, por lo tanto el valor marginal en el nudo 2 es menor que en el caso de referencia para todos los meses.

Problema con el mecanismo de iteraciones

A continuación se discute el problema que se presenta en este caso, debido al procedimiento iterativo que se utiliza para ajustar los retornos.

El origen de este problema es que el algoritmo empleado en EcoGes no admite restricciones del tipo $x_a = 0,5 \cdot x_b$, que son necesarias para incorporar retornos, evaporaciones, acuíferos unicelulares, etc.

Como se mencionó en la sección 4.3.6, para superar este inconveniente se resuelve el problema en forma iterativa: en la primera iteración los retornos se asumen nulos. En las sucesivas iteraciones el valor de los límites inferior y superior de los arcos de retorno se fija como: $l_{ret} = u_{ret} = coef.ret \cdot x_{demanda}$

Pero sucede que en cada optimización, el algoritmo no “ve” la relación entre retorno y demanda como sería deseable, sino que optimiza el valor de la demanda, respetando el valor establecido del retorno. Esto conduce a un sub-óptimo, en lugar del óptimo buscado. Es de esperar que el sub-óptimo esté cerca del óptimo, pero no se puede asegurar que sea así de forma general.

Para ejemplificar esta situación se resuelve analíticamente la asignación para el mes 1:

$$\text{Minimizar } FO \quad \text{sujeto a: } c_U + c_A + c_{C-2} = 39 \quad \text{y } c_{C-3} = c_{C-2} + 0,5 \cdot c_U$$

$$FO = (1000 - (90 \cdot c_U - 2,5 \cdot c_U^2)) + (1000 - (50 \cdot c_A - 0,5 \cdot c_A^2)) + (1000 - (40 \cdot c_{C-3} - 0,075 \cdot c_{C-3}^2))$$

reemplazando en la FO:

$$FO = 3000 - \{(90 \cdot c_U - 2,5 \cdot c_U^2) + (50 \cdot c_A - 0,5 \cdot c_A^2) + (40 \cdot (c_{C-2} + 0,5 \cdot c_U) - 0,075 \cdot (c_{C-2} + 0,5 \cdot c_U)^2)\}$$

$$FO = 3000 - \{90 \cdot c_U - 2,5 \cdot c_U^2 + 50 \cdot c_A - 0,5 \cdot c_A^2 + 40 \cdot c_{C-2} + 20 \cdot c_U - 0,075 \cdot (c_{C-2}^2 + 1,0 \cdot c_U \cdot c_{C-2} + 0,25 \cdot c_U^2)\}$$

$$FO = 3000 - \{90 \cdot c_U - 2,5 \cdot c_U^2 + 50 \cdot c_A - 0,5 \cdot c_A^2 + 40 \cdot c_{C-2} + 20 \cdot c_U - 0,075 \cdot c_{C-2}^2 - 0,075 \cdot c_U \cdot c_{C-2} - 0,01875 \cdot c_U^2\}$$

$$FO = 3000 - 110 \cdot c_U + 2,51875 \cdot c_U^2 - 50 \cdot c_A + 0,5 \cdot c_A^2 - 40 \cdot c_{C-2} + 0,075 \cdot c_{C-2}^2 + 0,075 \cdot c_U \cdot c_{C-2}$$

Este problema se minimizó usando el solver de Excel. Los resultados correctos y los obtenidos con EcoGes ven en el Cuadro 4.9.

variable	valor correcto	precio correcto	FO correcto	valor EcoGes	precio EcoGes	FO EcoGes
c_U	14,79	16,05	9216	11,62	31,92	9292
c_A	17,90	32,10	9265	18,12	31,92	9258
c_{C-2}	45,31	0,00	0	48,30	0,00	0
c_{C-3}	52,70	32,10	8100	54,10	31,92	8056
suma			26581			26606

Cuadro 4.9: Comparación de resultados para el mes 1, Caso E1.

Puede observarse que aunque el valor de FO es cercano, el volumen asignado al Uso U tiene una diferencia apreciable. También se ve que mientras que la solución de EcoGes consigue un precio único para todos los usos, la solución correcta da el mismo valor marginal (o precio) para los usos que están más aguas abajo, y un valor menor al que está aguas arriba y que tiene retornos aprovechables por otro uso.

Solución exacta

Posteriormente, se resolvió este caso mediante GAMS, agregando las restricciones lineales de los retornos, y sin usar el mecanismo de iteraciones.

Los resultados para distintos valores del coeficiente de retorno se muestran en la página siguiente. Al comparar el Cuadro 4.10 ($coef.ret. = 0,005(\sim 0)$), el Cuadro 4.11 ($coef.ret. = 0,5$) y el Cuadro 4.12 ($coef.ret. = 1,0$) se aprecia que el problema del mecanismo de iteraciones es más acusado cuanto mayor es el coeficiente de retorno utilizado, de forma que cuando los coeficientes de retorno usados son chicos, la solución obtenida mediante EcoGes es cercana a la solución obtenida usando otro algoritmo de mayor complejidad.

Esto constituye una limitación a la aplicación del programa, y es el “precio” que se ha de pagar por usar un algoritmo más sencillo y rápido. Si se quisiera modelar un sistema con muchos retornos de magnitud importante, habría que recurrir a otra herramienta.

mes	Aportación	Embalse	C-1	C-2	C-3	vm _{C-3}	C-4	C-5	Uso U	vm _{U,soU}	Uso A	vm _{U,soA}	Retorno	FO
1	39,0	0,0	39,0	49,1	49,2	32,6	0,0	39,0	11,5	32,5	17,4	32,6	0,06	26,791
2	94,0	48,0	46,0	64,4	64,4	30,3	44,0	50,0	12,0	30,2	19,7	30,3	0,06	26,225
3	62,0	64,0	46,0	64,4	64,4	30,3	12,0	50,0	12,0	30,2	19,7	30,3	0,06	26,225
4	43,0	54,0	53,0	64,4	64,4	30,3	0,0	43,0	12,0	30,2	19,7	30,3	0,06	26,225
5	44,0	46,0	52,0	64,4	64,4	30,3	0,0	44,0	12,0	30,2	19,7	30,3	0,06	26,225
6	25,0	0,0	71,0	64,4	64,4	30,3	0,0	25,0	12,0	30,2	19,7	30,3	0,06	26,225
7	122,0	0,0	122,0	128,8	128,9	20,7	72,0	50,0	13,9	20,6	29,3	20,7	0,07	24,286
8	756,0	483,2	272,8	256,6	256,7	1,5	706,0	50,0	17,7	1,5	48,5	1,5	0,09	22,615
9	395,0	605,4	272,8	256,6	256,7	1,5	345,0	50,0	17,7	1,5	48,5	1,5	0,09	22,615
10	233,0	565,6	272,8	256,6	256,7	1,5	183,0	50,0	17,7	1,5	48,5	1,5	0,09	22,615
11	27,0	296,8	295,8	256,6	256,7	1,5	0,0	27,0	17,7	1,5	48,5	1,5	0,09	22,615
12	13,0	0,0	309,8	256,6	256,7	1,5	0,0	13,0	17,7	1,5	48,5	1,5	0,09	22,615
total	1853,0		1853,0	1782,8	1783,6		1362,0	491,0	173,7		387,6		0,88	295,277

Cuadro 4.10: Resultados del Caso E1 con *coef. ret.* = 0,005.

mes	Aportación	Embalse	C-1	C-2	C-3	vm _{C-3}	C-4	C-5	Uso U	vm _{U,soU}	Uso A	vm _{U,soA}	Retorno	FO
1	39,0	0,0	39,0	45,3	52,7	32,1	0,0	39,0	14,79	16,0	17,9	32,1	7,4	26,580
2	94,0	48,0	46,0	60,7	68,3	29,8	44,0	50,0	15,02	14,9	20,2	29,8	7,5	26,023
3	62,0	64,0	46,0	60,7	68,3	29,8	12,0	50,0	15,02	14,9	20,2	29,8	7,5	26,023
4	43,0	54,0	53,0	60,7	68,3	29,8	0,0	43,0	15,02	14,9	20,2	29,8	7,5	26,023
5	44,0	46,0	52,0	60,7	68,3	29,8	0,0	44,0	15,02	14,9	20,2	29,8	7,5	26,023
6	25,0	0,0	71,0	60,7	68,3	29,8	0,0	25,0	15,02	14,9	20,2	29,8	7,5	26,023
7	122,0	0,0	122,0	125,9	133,9	19,9	72,0	50,0	16,01	10,0	30,1	19,9	8,0	24,135
8	756,0	483,2	272,8	255,2	264,2	0,4	706,0	50,0	17,96	0,2	49,6	0,4	9,0	22,607
9	395,0	605,4	272,8	255,2	264,2	0,4	345,0	50,0	17,96	0,2	49,6	0,4	9,0	22,607
10	233,0	565,6	272,8	255,2	264,2	0,4	183,0	50,0	17,96	0,2	49,6	0,4	9,0	22,607
11	27,0	296,8	295,8	255,2	264,2	0,4	0,0	27,0	17,96	0,2	49,6	0,4	9,0	22,607
12	13,0	0,0	309,8	255,2	264,2	0,4	0,0	13,0	17,96	0,2	49,6	0,4	9,0	22,607
total	1853,0		1853,0	1751,0	1848,8		1362,0	491,0	195,70		397,4		97,8	293,865

Cuadro 4.11: Resultados del Caso E1 con *coef. ret.* = 0,5.

mes	Aportación	Embalse	C-1	C-2	C-3	vm _{C-3}	C-4	C-5	Uso U	vm _{U,soU}	Uso A	vm _{U,soA}	Retorno	FO
1	39,0	0,0	39,0	41,1	59,1	31,1	0,0	39,0	18,0	0,0	18,9	31,1	18,0	26,321
2	94,0	48,0	46,0	56,8	74,8	28,8	44,0	50,0	18,0	0,0	21,2	28,8	18,0	25,782
3	62,0	64,0	46,0	56,8	74,8	28,8	12,0	50,0	18,0	0,0	21,2	28,8	18,0	25,782
4	43,0	54,0	53,0	56,8	74,8	28,8	0,0	43,0	18,0	0,0	21,2	28,8	18,0	25,782
5	44,0	46,0	52,0	56,8	74,8	28,8	0,0	44,0	18,0	0,0	21,2	28,8	18,0	25,782
6	25,0	0,0	71,0	56,8	74,8	28,8	0,0	25,0	18,0	0,0	21,2	28,8	18,0	25,782
7	122,0	0,0	122,0	122,9	140,9	18,9	72,0	50,0	18,0	0,0	31,1	18,9	18,0	23,971
8	756,0	472,3	283,7	248,7	266,7	0,0	723,0	33,0	18,0	0,0	50,0	0,0	18,0	22,606
9	395,0	600,6	266,7	248,7	266,7	0,0	345,0	50,0	18,0	0,0	50,0	0,0	18,0	22,606
10	233,0	566,3	267,3	248,7	266,7	0,0	183,6	49,4	18,0	0,0	50,0	0,0	18,0	22,606
11	27,0	303,7	289,7	248,7	266,7	0,0	0,0	27,0	18,0	0,0	50,0	0,0	18,0	22,606
12	13,0	0,0	316,7	248,7	266,7	0,0	13,0	0,0	18,0	0,0	50,0	0,0	18,0	22,606
total	1853,0		1853,0	1691,2	1907,2		1392,7	460,3	216,0		406,1		216,0	292,232

Cuadro 4.12: Resultados del Caso E1 con *coef. ret.* = 1,0.

4.6.10. Caso G1

A partir del Caso F1, se agregó un acuífero unicelular, como puede verse en la Figura 4.43. Este acuífero recoge las filtraciones profundas del uso *Uso U* y permite abastecer mediante bombeos al uso *Uso U2*.

Las características del caso E1, más:

- el acuífero unicelular tiene parámetros $\alpha = 0, 1$ y $V_{ini} = 180$.
- el uso *uso U*:
 - $Cof. Ret. U_{soU} = 0, 5$.
 - $Cof. Cons. U_{soU} = 0, 1$.
 - las filtraciones profundas al acuífero *Unicelular*.
- el uso *uso U2*:
 - igual volumen requerido que *Uso U*.
 - $Cof. Ret. U_{soU} = 0, 0$.
 - $Cof. Cons. U_{soU} = 1, 0$.
 - autorizado a bombear del acuífero *Unicelular* sin limitación en el volumen.

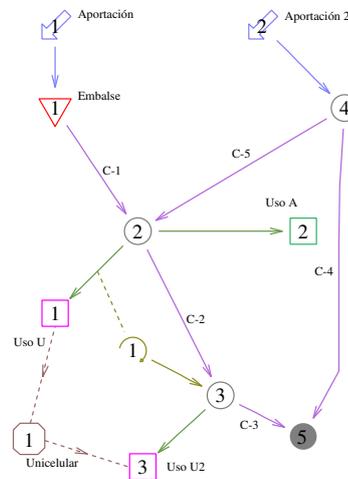


Figura 4.43: Esquema del Caso G1.

Los resultados se ven en el Cuadro 4.13 de la página siguiente.

Análisis

1. En los primeros 7 meses, en los que hay mayor escasez de agua, el uso *Uso U2* permanece mejor abastecido que el uso *Uso U* gracias a los bombeos desde el acuífero *Unicelular*. En los meses posteriores de mayor abundancia, los bombeos son parciales.
2. La disminución en el perjuicio económico respecto del caso de referencia tiene la contraparte de haber usado el agua almacenada en el acuífero.
3. El uso abastecido del sistema subterráneo, al disponer de una reserva con regulación mayor (la del acuífero), consigue mantener para los usos que abastece, un precio igual o más bajo que el de los usos abastecidos exclusivamente mediante agua superficial.

mes	Aport y Aport 2	Embal.	C-1	C-2	C-3	precio C-3	C-4	C-5	Uso U	precio Uso U
0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	39,0	0,0	39,0	48,3	54,1	31,9	0,0	39,0	11,6	31,9
2	94,0	48,0	46,0	63,5	69,5	29,6	44,0	50,0	12,1	29,6
3	62,0	64,0	46,0	63,5	69,5	29,6	12,0	50,0	12,1	29,6
4	43,0	54,0	53,0	63,5	69,5	29,6	0,0	43,0	12,1	29,6
5	44,0	46,0	52,0	63,5	69,5	29,6	0,0	44,0	12,1	29,6
6	25,0	0,0	71,0	63,5	69,5	29,6	0,0	25,0	12,1	29,6
7	122,0	0,0	122,0	127,7	134,8	19,8	72,0	50,0	14,0	19,8
8	756,0	472,6	283,4	266,9	258,1	1,3	706,0	50,0	17,7	1,3
9	395,0	597,4	270,2	253,7	258,1	1,3	345,0	50,0	17,7	1,3
10	233,0	557,0	273,4	257,0	258,1	1,3	183,0	50,0	17,7	1,3
11	27,0	289,6	294,3	254,9	258,1	1,3	0,0	27,0	17,7	1,3
12	13,0	0,0	302,6	249,2	258,1	1,3	0,0	13,0	17,7	1,3
Tot.	5559,0		1852,9	1775,1	1826,7		1362,0	491,0	174,8	

mes	Uso A	precio Uso A	Uso U2	precio Uso U2	Ret.	Unicel	Salida Unicel	B Ac 1 Uso U2	RecAc Unicel	perj.
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	180,0	0,0	0,0	0,0	0
1	18,1	31,9	17,7	1,3	5,8	150,4	16,5	17,7	4,7	35.795
2	20,4	29,6	17,7	1,3	6,0	123,8	13,7	17,7	4,8	35.235
3	20,4	29,6	17,7	1,3	6,0	99,7	11,2	17,7	4,8	35.235
4	20,4	29,6	17,7	1,3	6,0	78,0	8,9	17,7	4,8	35.235
5	20,4	29,6	17,7	1,3	6,0	58,3	6,8	17,7	4,8	35.235
6	20,4	29,6	17,7	1,3	6,0	40,4	4,9	17,7	4,8	35.235
7	30,2	19,8	17,7	1,3	7,0	25,1	3,3	17,7	5,6	33.335
8	48,7	1,3	17,7	1,3	8,9	30,1	2,0	0,0	7,1	31.802
9	48,7	1,3	17,7	1,3	8,9	22,2	1,8	13,2	7,1	31.802
10	48,7	1,3	17,7	1,3	8,9	17,3	2,0	9,9	7,1	31.802
11	48,7	1,3	17,7	1,3	8,9	11,0	1,4	12,0	7,1	31.802
12	48,7	1,3	17,7	1,3	8,9	0,0	0,3	17,7	7,1	31.802
Tot.	394,0		212,9		87,4	656,3	72,8	177,1	69,9	404.315

Cuadro 4.13: Resultados del Caso G1

4.6.11. Caso H2

A partir del Caso C1, se valoró el uso en el cauce C-2. El nuevo esquema es el mismo de la Figura 4.37, que se repite en la Figura 4.44.

Características:

- se resuelve para 12 periodos de tiempo.
- el embalse tiene capacidad máxima ilimitada, y $V_{fin} = V_{ini} = 0$.
- la conducción C-3 tiene un mínimo de 10 unidades.
- los elementos que contribuyen a la función objetivo son: *Uso U*, *Uso A*, C-2 y C-3.
- la curva de demanda de C-2 es la misma que la de C-3 (Figura 4.38).

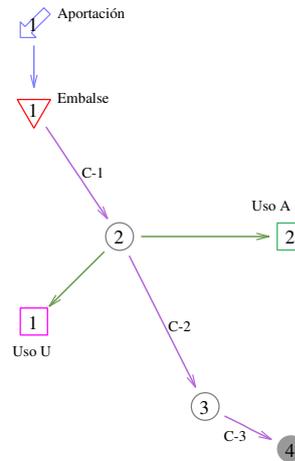


Figura 4.44: Esquema del Caso H2.

Los resultados se ven en el Cuadro 4.14.

mes	Aport.	Emb.	C-1	C-2 y C-3	precio C-2 y C-3	Uso U	precio Uso U	Uso A	precio Uso A
1	39,0	0,0	39,0	34,9	34,76	4,1	69,53	0,0	50,00
2	94,0	40,4	53,6	48,7	32,70	4,9	65,40	0,0	50,00
3	62,0	48,8	53,6	48,7	32,70	4,9	65,40	0,0	50,00
4	43,0	38,2	53,6	48,7	32,70	4,9	65,40	0,0	50,00
5	44,0	28,6	53,6	48,7	32,70	4,9	65,40	0,0	50,00
6	25,0	0,0	53,6	48,7	32,70	4,9	65,40	0,0	50,00
7	122,0	0,0	122,0	110,3	23,46	8,6	46,91	3,1	46,91
8	756,0	471,2	284,8	230,0	5,50	15,8	11,00	39,0	11,00
9	395,0	581,8	284,8	230,0	5,50	15,8	11,00	39,0	11,00
10	233,0	529,6	284,8	230,0	5,50	15,8	11,00	39,0	11,00
11	27,0	271,8	284,8	230,0	5,50	15,8	11,00	39,0	11,00
12	13,0	0,0	284,8	230,0	5,50	15,8	11,00	39,0	11,00
suma	1.853,0		1.853,0	1.538,6		116,3		198,1	

Cuadro 4.14: Resultados del Caso H2.

Análisis

1. Es interesante observar que:

$$p_{C-2} + p_{C-3} = p_U = v.marg. 2$$

o sea que el valor marginal del agua en el nudo 2 es único.

A los efectos prácticos es como si se tuviera el esquema que muestra la Figura 4.45, pero con una curva de demanda para el uso 3 que es la suma en vertical de las curvas de demanda de *C-2* y *C-3* (que como son iguales, resulta ser la curva de uno de ellos multiplicada por 2).

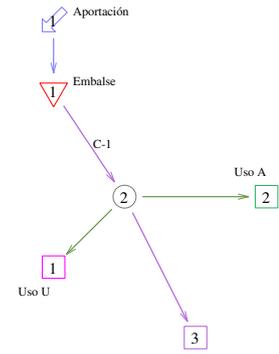


Figura 4.45: Esquema “virtual” del Caso H2.

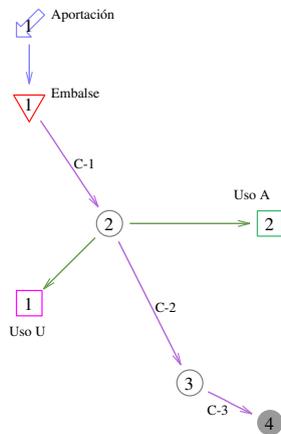
Esto muestra numéricamente una propiedad del problema dual, que se expone de forma general en las páginas 429-430 de [Bertsekas, 1991]. Esta propiedad dice que en el óptimo de un problema no lineal en redes de flujo, se verifica la holgura complementaria (CS en inglés) en todos los nudos de la red:

$$p_i - p_j = a_{ij} + b_{ij} \cdot x_{ij} \quad , \text{ siendo } i, j \text{ nudos de la red.}$$

2. Los efectos de la asignación son notables. Dado que *C-2* y *C-3* son usos que están en serie, al adicionar valor al uso *C-3*, aumenta el valor marginal del agua aguas arriba de ese elemento, reduciéndose en forma notoria la asignación a los restantes elementos. Observese que en los primeros meses el *Usos A* no recibe nada de agua.
3. Por el contrario, *Usos U* y *Usos A* que están en paralelo, y sus curvas de demanda se suman en horizontal.

4.6.12. Caso J1

Este caso es idéntico al Caso B1, pero ahora se han realizado 10 optimizaciones, cada una comenzando con el mismo V_{ini} en el embalse y utilizando una serie de aportación distinta. Las 10 series de la aportación se obtuvieron tomando años sucesivos de una serie de 10 años de extensión. El esquema es igual al del caso de referencia, y se reproduce en la Figura 4.46.



Características:

- se resuelve para 12 periodos de tiempo.
- el embalse tiene capacidad ilimitada, y $V_{fin} = V_{ini} = 0$.
- la conducción C-2 tiene un valor mínimo obligatorio de 10 unidades.
- los elementos que contribuyen a la función objetivo son *Uso A* y *Uso U*.
- las curvas de demanda de los usos son las mismas del Caso A1.

Figura 4.46: Esquema del Caso J1.

Se obtienen 10 series de valor marginal en cada nudo (la serie correspondiente a la primera optimización es la del Caso B1 de referencia). Con estas múltiples series se puede hacer un análisis probabilístico del valor marginal del recurso en el SRH considerado. Sólo se han usado 10 series por tratarse de un caso de ejemplo, pero en un caso real se usarían más (500 o 1000, según el almacenamiento natural de la cuenca y las características del SRH).

Los resultados se han representado en la Figura 4.47.

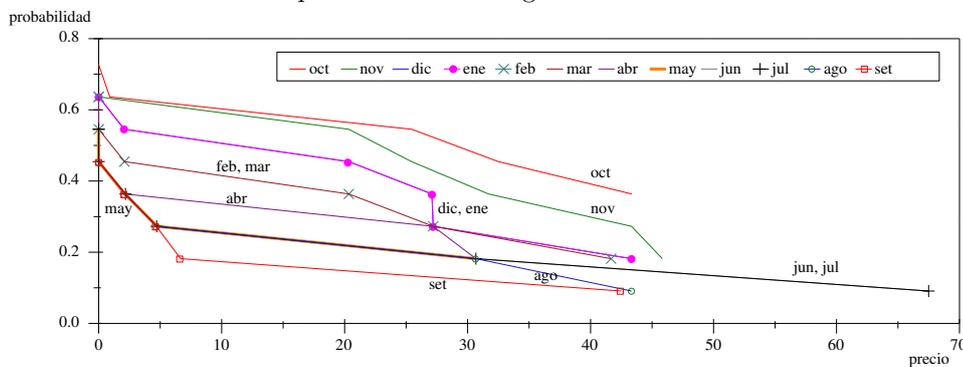


Figura 4.47: Probabilidad de igualar o superar el precio (o valor marginal) en el nudo 2.

Análisis

1. Las líneas correspondiente a cada mes en general no se cruzan porque en este ejemplo se inicia la optimización con el embalse vacío, de forma que en octubre, la probabilidad de que resulte un precio grande es elevada, porque no hay almacenamiento inicial.
2. Por el contrario, el mes de setiembre (último mes) se tiene para una misma probabilidad valores menores, porque casi siempre hay agua almacenada en el embalse que contribuye a disminuir el valor marginal.

Este enfoque probabilístico presentado en este caso es muy potente, porque permite *disminuir* la influencia de la hipótesis de conocimiento perfecto de las aportaciones hidrológicas, y amplía las posibilidades de uso de esta clase de modelos de optimización. Sin embargo, adviértase que se dice disminuir, porque esta hipótesis no desaparece: aunque se utilicen cientos de series, al asignar el agua se conoce perfectamente todos los valores de la serie que se está utilizando, y se consigue una asignación óptima para esas aportaciones.

4.6.13. Conclusiones del análisis de los casos simples con EcoGes

Recapitulando los resultados de los casos simples, cada uno de ellos permite extraer algunas conclusiones cualitativas del funcionamiento del mecanismo de mercado para la asignación del agua, que ayudan a pensar esta clase de problemas.

- Caso A1: el agua se reparte entre usos a valor marginal constante.
- Caso A2: el valor marginal es inverso a la escasez.
- Caso B1: el embalse consigue estabilizar la oferta.
- Caso B2: los beneficios obtenidos (o los perjuicios evitados) no son proporcionales a la capacidad de almacenamiento del embalse.
- Caso B3: el valor marginal se mantiene lo más constante posible, independientemente de las curvas de demanda o las funciones económicas de los elementos.
- Caso B4: respuesta del precio de equilibrio ante el aumento de la capacidad de regulación. Importancia de la regulación e influencia de la tasa de convergencia del algoritmo en el resultado final.
- Caso C1: al agregar un uso, el valor marginal aguas arriba aumenta, y las asignaciones disminuyen al valorizarse más el agua (o al aumentar su valor marginal).
- Caso D1: la transferencia desde el exterior aumenta la oferta y disminuye el valor marginal.
- Caso E1: la existencia de retornos impide la obtención del punto óptimo con el enfoque de redes de flujo empleado. El subóptimo hallado estará cercano siempre que los coeficientes de retorno sean chicos. A cambio de este defecto, se gana velocidad de resolución.
- Caso G1: los usos abastecidos con agua de dos orígenes (superficial y subterránea, por ejemplo) sufren menos la escasez (precios menores) gracias a tener más opciones para elegir.
- Caso H2: los usos en serie actúan sumando verticalmente sus curvas de demanda.
- Caso J1: aplicación del *enfoque estocástico* para considerar la incertidumbre en las aportaciones hidrológicas. Permite obtener la probabilidad empírica de que el valor marginal del recurso tenga un cierto valor, a partir de una condición inicial conocida.

En el caso de aplicación de la cuenca del río Júcar, se verán los efectos presentados individualmente en estos casos simples actuando de forma simultánea y superpuesta.

Capítulo 5: Programa MEvalGes

La optimización económica descrita en el Capítulo 4 es interesante desde el punto de vista teórico y académico, porque es la aplicación directa de rigurosos conceptos económicos. Sin embargo, la asignación mediante un mercado normalmente estará tan alejada de la gestión actual que constituye una situación no factible bajo las condiciones institucionales, legales y sociales.

Atendiendo a esta consideración se desarrollaron otros dos programas, en los cuales los aspectos económicos no asumen el protagonismo en la gestión; sino que se introducen para obtener indicadores que puedan poner en evidencia aspectos de la gestión actual que son económicamente ineficientes. De esta forma, se incorpora información del valor del agua en los distintos usos y de los costos de operación del sistema, de una forma complementaria, más aceptable por parte de usuarios y organismos técnicos. Estos programas son EvalGes y MEvalGes.

EvalGes permite evaluar el beneficio neto que reporta a los usuarios una determinada asignación del recurso, conociendo previamente las funciones económicas de los elementos del sistema.

MEvalGes permite valorar sistemáticamente el costo marginal del recurso y una parte del costo medioambiental en cuencas hidrográficas. Estos valores son requeridos para la correcta aplicación de la Directiva Marco Europea del Agua (DMA) [UE, 2000] en las cuestiones económicas referidas en el Art. 5 y el Art. 9, como se verá más adelante.

La aplicación de estos dos programas requiere que se disponga previamente de un esquema (adecuadamente validado) del SRH modelado con SimGes. El uso de un modelo de simulación (SimGes u otro) es imprescindible para capturar el comportamiento de la cuenca como una unidad, representando adecuadamente todos los elementos de la misma, y preservando en especial las interacciones entre los distintos componentes, como por ejemplo entre el agua superficial y subterránea.

Se asume que el esquema del SRH validado representa adecuadamente la gestión *actual* del recurso hídrico, integrando todos los aspectos que actualmente intervienen para determinar el reparto (legales, institucionales, de praxis, etc.). Este punto de partida es bastante razonable al menos en España, donde muchas Confederaciones Hidrográficas utilizan o han utilizado el mencionado programa.

Como se mencionó anteriormente, los modelos de simulación son más flexibles y simples que los modelos homólogos de optimización en cuanto a la complicación matemática

que suponen, lo que se verá reforzado a lo largo de este capítulo.

En este capítulo se realiza primero una somera descripción de SimGes, porque es este modelo el que simula la gestión del agua, en la metodología presentada.

Posteriormente se describe el programa EvalGes y la forma en la que se usa como post-proceso del módulo de simulación de la gestión SimGes.

Luego se describe el programa MEvalGes, que incorpora dentro a SimGes y a EvalGes, y que es el programa más utilizable y potente de los presentados en este capítulo.

También se discuten ciertos aspectos de interés respecto a los datos necesarios, para limitar los alcances de los resultados de los modelos.

Finalmente, se presentan los aspectos prácticos del uso de este programa, mediante la interfaz Gestal. Esta interfaz es el resultado de un esfuerzo especialmente dirigido a facilitar lo más posible a los usuarios el empleo de los programas desarrollados.

5.1. Breve descripción de SimGes

SimGes [Andreu et al., 1992] es un modelo de simulación de un sistema de recursos hídricos, que forma parte del SSD Aquatool. La filosofía del conjunto SimWin-SimGes es similar a la del conjunto OptiWin-OptiGes anteriormente descrito en la sección 4.2.

El esquema del SRH a simular se crea mediante una interfaz gráfica (SimWin), que permite agregar uno a uno los elementos y las propiedades de los mismos hasta conformar el sistema (Figura 5.1).

Los elementos admitidos son:

- aportaciones.
- demandas.
- embalses.
- retornos.
- recargas artificiales.
- bombeos adicionales.
- acuíferos (de 5 tipos distintos).
- centrales hidroeléctricas.
- conducciones tipo 1 (sin pérdidas ni ganancias).

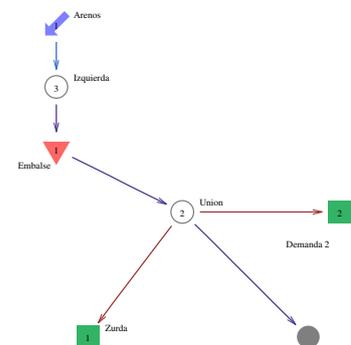


Figura 5.1: Ejemplo de esquema del SRH.

- conducciones tipo 2 (con pérdidas).
- conducciones tipo 3 (con pérdidas o ganancias).
- conducciones tipo 4 (flujo en función de la diferencia de cota).
- conducciones tipo 5 (flujo bidireccional según la diferencia de cota).
- indicadores de alarma.

El modelo tiene paso temporal mensual, por lo que los valores significativos se pueden establecer con valores distintos mes a mes.

Una vez que el esquema está finalizado, el usuario ejecuta SimGes. Hecho esto, el usuario puede ver los resultados de la simulación mediante la interfaz antes mencionada.

La forma en la que el modelo opera es la siguiente: cada mes se procesa individualmente, comenzando con las condiciones iniciales establecidas por el usuario. Las condiciones al final del primer mes se toman como condiciones iniciales para el siguiente mes, y así sucesivamente.

El usuario debe definir para las demandas, volumen mínimo de conducciones, centrales hidroeléctricas, etc. prioridades relativas, que se usarán en caso de no haber suficiente agua. Con estas prioridades definidas por el usuario y un archivo de coeficientes ficticios `Costes.dat` el programa construye una función objetivo lineal que optimiza mes a mes, determinando así los flujos resultantes de la simulación.

SimGes realiza la asignación en base a prioridades relativas entre los elementos, establecidas por el modelador; esto es como si se asignara a los elementos funciones económicas constantes, como las de la Figura 5.2.

Los usos que tienen igual prioridad constituyen un grupo *isoprioritario*. Si en un mes dado el agua no alcanzara para el requerimiento de todos los usos de ese grupo, el déficit se reparte entre ellos proporcionalmente al requerimiento.

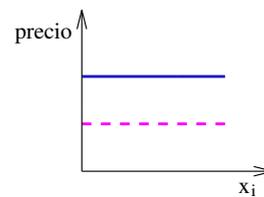


Figura 5.2: Funciones económicas implícitas en SimGes.

SimGes dispone también de un mecanismo para disminuir la asignación en época de escasez: son los *indicadores de alarma* o *indicadores de restricción*. Estos indicadores afectan a los usos, y los define el usuario. Cada indicador se define con pares de valores, que relacionan el volumen almacenado en uno o varios embalses con un porcentaje del volumen requerido por los usos. De esta forma se consigue que cuando los embalses están a bajo nivel, la entrega a los usos disminuya, y repartiendo de esa forma los efectos de una sequía.

En breve síntesis, este es el funcionamiento de SimGes. En el manual del usuario están documentadas todas las hipótesis del modelo y las ecuaciones utilizadas.

5.2. EvalGes

Este programa está escrito en lenguaje Fortran, y calcula el beneficio neto actualizado de una determinada asignación de agua en un SRH.

5.2.1. La función a evaluar

El programa EvalGes evalúa la siguiente función de beneficio actualizado:

$$BA = \sum_{k=1}^{nT} \frac{1}{(1+i)^k} \left(\sum_{e=1}^{nE} \int_0^{x'_{ke}} fe_{ke}(x_{ke}) dx_{ke} \right) \quad (5.1)$$

siendo: nT : número de periodos (meses) a optimizar.

nE : número de elementos del sistema.

x'_{ke} : cantidad asignada en el periodo de tiempo k para uso e (datos).

fe_{ke} : la función económica en el periodo de tiempo k del uso e (datos).

i : tasa de interés para un periodo de tiempo (dato).

El lector puede haber notado que la ecuación 5.1 es igual a la ecuación 4.3. Sin embargo la situación es bien distinta a la del capítulo 4: en este caso los x'_{ki} en lugar de ser incógnitas son datos —proporcionados por el modelo de simulación previamente empleado— con lo cual la evaluación de esta función no presenta ninguna dificultad.

En este desarrollo no es necesario que la función económica (fe) sea continua y derivable como en la sección 4.3; ni tampoco es necesario que sea una función de una sola variable x_e , porque no es necesario que Bn sea una función separable. Sin embargo, pesar de esto y por continuidad con el modelo EcoGes antes desarrollado, se adopta la siguiente función paramétrica:

$$fe_e = a_e + b_e \cdot x_j + c_e \cdot x_j^2 + \frac{d_e}{(x_j + e_e)} + f_e \cdot x_j^{g_e} \quad (5.2)$$

donde $a_e, b_e, c_e, d_e, e_e, f_e$, y g_e son parámetros (datos).

Conviene destacar la flexibilidad que presenta la Ecuación 5.2 para representar distintas formas de funciones, de manera que puede adaptarse a la gran mayoría de las situaciones prácticas.

Observe también que en la Ecuación 5.2 $fe_e = f(x_j)$. Esto significa que el valor o el costo marginal en un elemento puede ser función del estado de otro elemento. En la mayoría de los casos $j = e$, pero no por ejemplo en los bombeos, por las razones mencionadas en la sección 4.3.1.

5.2.2. El procedimiento de evaluación

Para evaluar la ecuación 5.1 se utilizan dos grupos de datos:

- una simulación de la gestión, que se realiza con el modelo SimGes antes descrito.
- las funciones económicas (f_e) declaradas para los distintos elementos del sistema.

El beneficio neto o excedente de la asignación, para un elemento e y en un periodo de tiempo, es el área bajo la función económica hasta la cantidad asignada por el modelo de simulación, tal como muestra la Figura 5.3.

Así, para cada elemento e se tiene una serie temporal ($k = 1$ a nT) de volumen asignado $V_{e,k}$ (Figura 5.4, a) y dependiente de ésta, una serie temporal de beneficios netos $Bn_{e,k}$ (Figura 5.4, b).

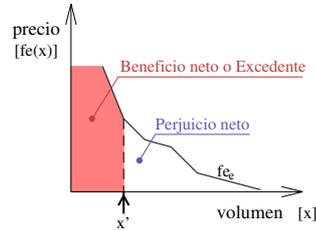


Figura 5.3: Obtención del beneficio neto para un elemento e en un mes.

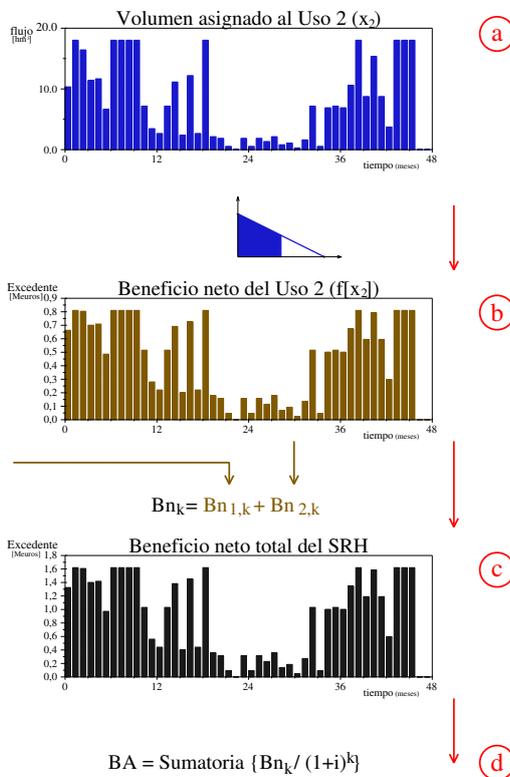


Figura 5.4: Pasos de la evaluación económica realizada por EvalGes.

En cada mes, sumando la contribución de todos los elementos, se obtiene una serie temporal de beneficio neto de todo el sistema (Figura 5.4, c):

$$\forall k = 1, \dots, nT \quad Bn_k = \sum_{i=1}^{nE} Bn_{e,k} \quad (5.3)$$

Posteriormente, si procede, se obtiene el valor actual de este flujo de beneficios mediante los procedimientos clásicos de actualización, y se consigue un único número BA , que es el beneficio neto agregado del SRH (Figura 5.4, d):

$$BA = \sum_{k=1}^{nT} Bn_k / (1 + i)^k \quad (5.4)$$

Siendo: i la tasa de interés del período (mes).

Como se está realizando un análisis económico, se debe usar una tasa de interés social, que es menor que la tasa empleada para hacer un análisis financiero, por lo que incluso sería aceptable adoptar $i = 0$, dependiendo de las condiciones concretas del caso bajo análisis.

Para permitir más flexibilidad en los pasos temporales, y pensando en usos agrarios, se puede considerar: $x_j = \Sigma x_i$, de forma que el beneficio unitario en algunos elementos puede ser función del suministro acumulado a lo largo de todo el ciclo agrícola, en lugar de computarlo individualmente en cada mes. Esto simplemente permite reducir la discretización del tiempo a los efectos de la evaluación económica, considerando intervalos más bastos que un mes, pero para los cuales puede ser más fácil conseguir datos. Esta opción no altera en absoluto la validez de lo anteriormente mencionado y desarrollado.

Como se puede ver, la evaluación realizada es simple. Sin embargo, al utilizarse conjuntamente con el modelo de simulación su utilidad se potencia, como se verá más adelante.

Funciones económicas

La fe de cada elemento representa el costo o la disposición a pagar para que cierto volumen circule por el elemento considerado.

En los elementos en los que se usa el agua (y en los que el agua produce beneficios) la fe será positiva, y en principio coincidente con la curva de demanda. Los elementos que tienen costos asociados (bombeos, etc.) la fe será negativa. Los elementos que tienen tanto beneficios como costos, los valores de la fe son la diferencia de beneficios menos costos para cada nivel de volumen circulante.

Evidentemente el modelador debe estimar tanto el costo como la disposición a pagar para distintos valores de flujo por medio de estudios económicos previos. La fe incluye todo lo que el modelador quiera que contenga. En sus manos está el usar correctamente (o no) el programa, según incluya (o no) todos los aspectos para contabilizar adecuadamente todos los costos y beneficios relevantes. Como en cualquier balance, se ha de tener cuidado de no olvidar computar ningún término, ni computarlo doblemente.

5.3. MEvalGes

Seguidamente se describirá el programa MEvalGes (Multiple Evaluación de la Gestión), que consiste en el uso reiterado y combinado de EvalGes y SimGes. Este programa permite calcular, de forma sistemática, una aproximación al valor marginal del recurso (o también costo del recurso) y una aproximación al costo marginal de las restricciones operativas del sistema (como por ejemplo, el costo de las restricciones ambientales, o más brevemente costo medioambiental) en una cuenca o SRH.

En primer término, hay que destacar el adjetivo marginal que acompaña a los costos antes mencionados (costo marginal del recurso y costo marginal ambiental). Esto pone en evidencia que los valores a obtener no son valores medios, sino que dependen del punto del sistema que se esté analizando, y que varían en el tiempo, reflejando las cambiantes condiciones hidrológicas, económicas y operativas de la cuenca.

En segundo lugar hay que mencionar que por ser la cuenca hidrográfica el ámbito físico donde se concentra la oferta hídrica [Dourojeanni et al., 2002], es necesario recurrir a modelos que preserven esta unidad de análisis, representando lo más adecuadamente posible los distintos fenómenos que allí se producen.

Se remarca también que se trata de una aproximación a los valores marginales del recurso. Esto porque sólo es apropiado hablar de valor del recurso (a secas) cuando la asignación es económicamente óptima, y esto se logra al considerar todo el horizonte temporal de forma simultánea, mientras que acá cada intervalo de tiempo (mes) se gestiona en forma independiente, partiendo la situación precedente como determinada.

5.3.1. Definiciones útiles

El *valor marginal del recurso* en un punto y en un instante se puede definir como el costo de oportunidad del agua (véase sección 2.3.1); o dicho de otra forma, es el costo que supone para el sistema disponer de una unidad menos de recurso, o lo que es lo mismo: el beneficio que obtendría el sistema de disponer de una unidad más de recurso. Este valor es un indicador de la escasez de agua y de la disponibilidad de pago de los usuarios para mitigar esa escasez.

El *coste medioambiental*, o coste de un determinado nivel ambiental, se puede definir como el costo de oportunidad en que incurre la sociedad para conseguir dicho standard ambiental (suma de los costos de cumplir e implementar la regulación, y de la reducción en producción por destinar agua a fines ambientales y no productivos [USEPA, 2000]). En una primera aproximación se consideran nulos los costes de transacción, por lo que el costo medioambiental solo dependerá de la disminución de beneficios en otros usos del agua.

Por ejemplo, el mantenimiento de unos caudales ecológicos en un tramo de río supone un coste para el sistema productivo asentado en la cuenca, correspondiente a las pérdidas económicas por reducción del suministro a los distintos usos.

5.3.2. Fundamentos generales

El programa MEvalGes aplica las definiciones anteriores al SRH bajo análisis.

En cada intervalo de tiempo, el indicador a calcular se obtiene de la comparación de la evaluación económica (BA) de dos casos levemente distintos, que se denominan *caso base* y *caso modificado*.

- el *caso base* representa la situación actual de asignación.
- el *caso modificado* es muy similar al caso base, pero tiene una pequeña perturbación introducida intencionalmente en el mes analizado. Cuál es la perturbación (Δ) y cómo se aplique dependerá del indicador a calcular, como se verá más adelante.

La idea básica es estimar el valor marginal del indicador mediante un cociente de diferencias (Figura 5.5). En el numerador hay una diferencia de beneficios económicos netos ($BA_m - BA_b$), y en el denominador una diferencia de volumen ($\Delta = x_m - x_b$).

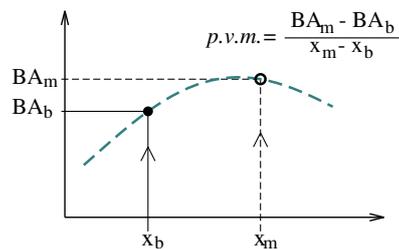


Figura 5.5: Idea básica de la metodología de MEvalGes.

Para esta propuesta metodológica se usan los siguientes componentes:

- un modelo de simulación de la cuenca.
- las funciones económicas de los elementos (son datos del problema).
- un módulo de programa que evalúa económicamente la asignación obtenida de la simulación.

Dichos componentes están incluidos dentro del programa MEvalGes, que realiza los distintos cálculos que se explican en el resto de esta sección.

Simulación de la asignación

La asignación o reparto de agua entre los elementos del sistema se obtiene usando el modelo de simulación SimGes, descrito en la sección 5.1. El SRH en el que se va a realizar el análisis económico se ha modelado previamente en SimGes, y se asume que dicho modelo reproduce adecuadamente la asignación actual del recurso, considerando los múltiples aspectos intervinientes (legales, institucionales, etc.) antes mencionados.

Este punto de partida es bastante razonable, puesto que este modelo es flexible para reproducir los distintos criterios de asignación.

Evaluación económica de la asignación

Conocida la asignación del recurso y conocidas las funciones económicas, se puede evaluar el beneficio económico asociado, siguiendo el procedimiento de la sección 5.2.2 que ejecuta el módulo EvalGes. Se obtiene un único valor beneficio neto agregado (BA) o excedente neto agregado de todo el SRH.

Cálculo del indicador

Los indicadores a calcular se pueden clasificar en dos grupos:

- a) el pseudo-valor marginal del recurso (se calcula en nudos del sistema).
- b) el pseudo-costo marginal de las restricciones (en usos, conducciones o embalses).

Para cada grupo se sigue un procedimiento diferente, explicado a continuación en las secciones 5.3.3 y 5.3.4 respectivamente.

5.3.3. Pseudo-valor marginal del recurso

Para el cálculo de una aproximación del valor del recurso en un nudo del sistema y en un determinado periodo de tiempo, la alteración introducida (en el caso modificado) consiste en agregar un volumen diferencial de agua en dicho nudo y en dicho periodo.

Luego, para este caso modificado se obtiene la asignación aplicando SimGes, y la correspondiente evaluación económica con EvalGes. Estos dos procesos se hacen siguiendo idénticos criterios que los utilizados en el caso base. Razone el lector que en todos los períodos previos al que se está analizando (y modificando), el resultado del caso base y del caso modificado serán idénticos.

Entonces, una aproximación al valor marginal del recurso (o *pseudo-valor marginal del recurso*) en el nudo j y el periodo k se obtiene mediante:

$$p.v.m.r._{(j,k)} = \frac{(BA^{caso\ modificado} - BA^{caso\ base})}{\Delta volumen} \quad (5.5)$$

Se necesita un caso modificado para cada periodo del horizonte temporal a analizar, y esto para cada nudo del sistema que el usuario desee analizar.

El valor de $\Delta volumen$ lo elige el usuario de forma que sea chico respecto a los volúmenes del sistema, pero que al mismo tiempo sea detectable por la precisión del modelo de simulación.

La Figura 5.6 muestra el diagrama de flujo de MEvalGes para el cálculo del pseudo-valor marginal del recurso en nudos del sistema.

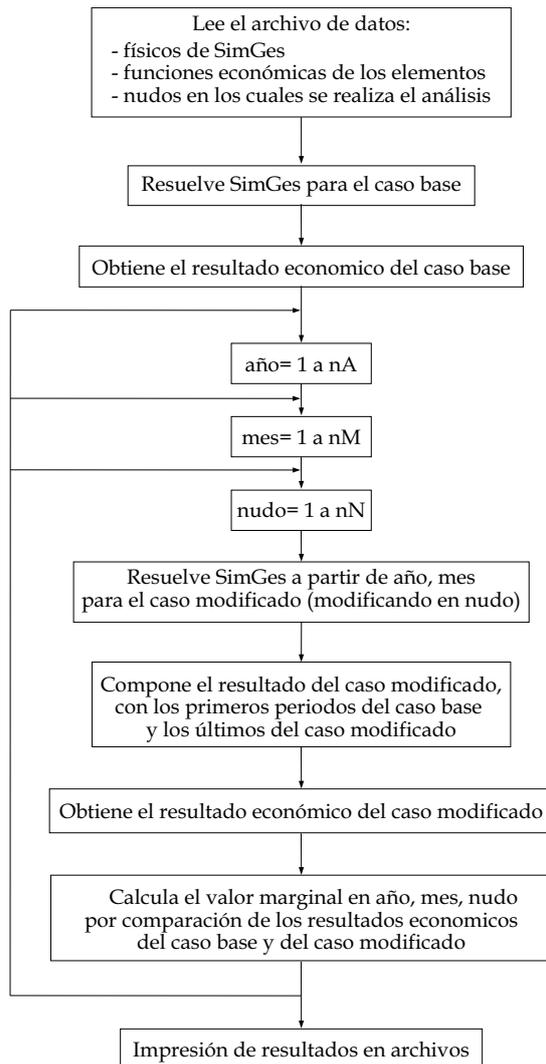


Figura 5.6: Diagrama de flujo de EvalGes, para el cálculo del p.v.m.r. en nudos.

El pseudo-valor marginal del recurso es un indicador de la escasez relativa (relativa a los usos existentes en el SRH) del recurso y de los efectos económicos que provoca dicha escasez con la asignación actual. Dependiendo de cuan económicamente eficiente sea la asignación actual, la aproximación al valor del recurso será más o menos parecido al valor del recurso obtenido con una optimización económica del sistema.

5.3.4. Pseudo-costo marginal de las restricciones

De forma similar al procedimiento usado en la sección 5.3.3; para calcular una aproximación al costo de las restricciones volumétricas en un elemento del sistema (conducción, embalse, uso, etc.) en un determinado periodo de tiempo, la alteración introducida (en el *caso modificado*) consiste en modificar dicha restricción en una unidad diferencial en ese mes.

Nuevamente para el caso modificado se obtiene la asignación aplicando SimGes, y la correspondiente evaluación económica con EvalGes. Y la aproximación al costo de la restricción (o *pseudo-costo marginal de la restricción*) en el elemento i y el periodo k se obtiene mediante:

$$p.c.m._{(i,k)} = \frac{(BA^{caso\ modificado} - BA^{caso\ base})}{\Delta restricción} \quad (5.6)$$

El caso modificado ha de resolverse para todos los periodos del horizonte temporal analizado, y para todas las restricciones del mismo tipo a analizar. Los tipos de restricciones a modificar son los siguientes:

- volumen mínimo de una conducción.
- volumen requerido por un uso.
- volumen mínimo de un embalse.
- volumen máximo de un embalse.

En cada ejecución del programa solo modifica una de las restricciones antes mencionadas. Si se quiere analizar varias hay que realizar una ejecución por cada tipo.

Como en SimGes los valores arriba listados los define el usuario con un valor para cada uno de los 12 meses, que se aplica todos los años de la simulación, se construyó el programa de forma que las modificaciones antes listadas se puedan aplicar de dos formas:

- en un único periodo en toda la simulación (hay $12 \cdot años$ simulaciones modificadas).
- en todos los periodos que corresponden a un mes en cuestión (todos los eneros, o todos los febreros, etc.; de forma que hay sólo 12 simulaciones modificadas).

Resultados de ejemplos con una y otra opción se verán en la sección 5.7.10 y siguientes.

Normalmente, las restricciones ambientales consisten en un volumen mínimo en los distintos tramos de río, o de un volumen mínimo almacenado en embalses. El modelo puede determinar cómo se modifican los resultados económicos para cambios en estos valores; y no sólo esto, sino como repercutirán esos cambios en los distintos elementos (zonas, sectores, etc.) del sistema.

El diagrama de flujo para el cálculo de estos indicadores es similar al de la Figura 5.6, sólo que en este caso es otra la modificación realizada, y que $nA = 1$.

5.3.5. Otros asuntos de interés

Importancia y contenido de la función económica

Ya se mencionó anteriormente de forma somera el contenido y sentido de las funciones económicas. Dado que su estimación es vital para obtener resultados útiles, nos detendremos un poco más en ellas.

El contenido de las f_e depende en parte de cómo se represente o modele el SRH. Por ejemplo: la f_e asociada al suministro de agua a una zona de riego, inicialmente será la curva de demanda de dicha zona; pero si se consideran también las externalidades de los vertidos contaminantes (sería deseable que se hiciera), se debe valorar negativamente los retornos, y sumarlos a la f_e anterior. Ahora, si los vertidos se tratan, no se incluirá esta valoración negativa de las externalidades, pero sí los costos de tratamiento. Si en el esquema hay un elemento de retorno que recoge el sobrante de la demanda, el efecto del vertido contaminante también podría considerarse en la f_e de éste en lugar de considerarlo en la demanda.

El contenido también depende del tipo de estudio a emprender y su finalidad: si se trata de estudiar la gestión del sistema, los costos fijos no deben ser incluidos; pero si se tratara de estudiar una propuesta de infraestructura, se deberán incluir los costos de amortización.

En general, los costos pueden estimarse con mejor precisión que los beneficios.

Como se dijo con anterioridad, para obtener valores confiables de los indicadores, es menester incluir todos los beneficios y costos relevantes relacionados con el uso y circulación del agua en el SRH, lo cual en la práctica no resulta una tarea sencilla.

Curva de demanda

La curva de demanda, como ya se explicó en la sección 2.3.2, representa la disposición a pagar por parte de los usuarios/consumidores por conseguir cierta cantidad de agua. Es la consecuencia del comportamiento de los usuarios en las condiciones actuales. No interesa el por qué se comporta el usuario de cierta forma, sino solamente cómo se comporta. No interesa si al usuario le es rentable o no usar tal o cual cantidad de agua, eso será asunto suyo; sólo interesa que por ejemplo, para disponer de $0,2 \text{ hm}^3$ está dispuesto a pagar 1 €.

Si existiera un mercado del agua con ciertas condiciones de transparencia y no distorsión, la valoración del bien coincidiría con el precio de mercado del mismo. Determinar para un bien de mercado la curva de demanda precio (relación precio-cantidad demandada) no es tarea sencilla. Cuanto más difícil será entonces en el caso que nos ocupa, en que no existe un mercado en el que se valore el agua.

Se quiere alertar al lector acerca del hecho que esta aproximación tiene muchas incertidumbres intrínsecas, y que estas son de un orden de magnitud mayor al que se acostumbra a tratar en ingeniería. Son incertidumbres propias de las ciencias sociales, que intentan describir comportamientos y conductas humanas.

Se asume que las fe son independientes unas de otras, lo cual no es correcto en todos los casos, pero simplifica la obtención de las mismas. Por ejemplo, como los modelos tienen paso mensual, se necesita una curva para cada mes, y se asume que la fe de enero es independiente de la fe de febrero, etc. Para el uso agrícola sabemos que esto no es correcto. Si se ha recibido poca agua un mes, la disposición a pagar en el mes siguiente aumenta, ya que a los usuarios les influye la “historia” de suministro de una cierta cantidad de meses previos, como también las expectativas que se tengan del futuro. En el extremo, si el cultivo no perenne alcanza su punto de marchitez permanente, la demanda para el resto del ciclo agrícola será nula. Lamentablemente este efecto no se puede representar en el modelo de simulación. Evidentemente la mejor o peor aproximación a la realidad dependerá del tipo de cultivo (perenne o de ciclo anual o estacional) y de la forma de organización que se tenga en la región modelada. A este aspecto se le debe dedicar una atención especialmente cuidadosa.

Para disminuir este efecto se ha incluido en el programa la posibilidad de utilizar una fe anual en lugar de fe mensuales. Para los elementos que tengan una fe anual, el programa suma la asignación para todos los meses y luego evalúa esta suma anual. De esta forma es posible considerar los cambios de excedente de una zona agrícola al aumentar o disminuir la superficie efectivamente regada en años hidrológicos ricos o pobres.

Hace falta mucho trabajo para estimar las curvas de demanda para los distintos usos del agua. Habrá que dedicar tiempo y dinero a esta tarea, así como se dedica a la medición de parámetros hidrológicos desde hace un siglo. Como la DMA obliga a desagregar los usos del agua en al menos 3 grupos: urbanos, industriales y agrícolas, es una buena oportunidad para profundizar el conocimiento con al menos este nivel de detalle sectorial.

Calidad del agua

Evidentemente, la forma correcta de tratar el recurso hídrico es considerar conjuntamente el par cantidad-calidad. La disposición de pago está muy vinculada a la calidad respecto del uso al que se destina. Por ejemplo una ciudad estará dispuesta a pagar más por un agua blanda que por un agua dura, por un agua sin nitratos que por una que tenga exceso de estos, hasta llegar al punto que no pagaría nada por un agua que por su calidad no fuera potabilizable.

También se mencionó anteriormente que la modelación en esta componente está recibiendo actualmente mucha atención por parte de diversos investigadores para incluir modelos de calidad dentro de los SSD usados en planificación y gestión de SRH [Dai y Labadie, 2001, de Azevedo et al., 2000, Percia et al., 1997].

En lo que estrictamente se refiere a la evaluación económica presentada en este capítulo, una forma de considerar las dos variables (cantidad y calidad), sería agregar una dimensión a la curva de demanda, que se transformaría en una superficie. Esto complica excesivamente el problema; por lo que se ha preferido considerar la calidad de dos formas, que conjuntamente se cree que resuelven razonablemente bien el problema:

- se dispone de un simulador simple de calidad, que funciona como post-proceso. Este simulador de calidad obtiene para la asignación del modelo SimGes los valores de los contaminantes simulados a lo largo del tiempo.

Mediante un proceso de “prueba y error” se puede comparar las concentraciones de los distintos contaminantes simulados, en distintas asignaciones representadas.

- en segundo término el modelo económico debe construirse para una calidad aproximadamente constante (próxima a la calidad natural o agua cruda). Las aguas cuya calidad difieran en forma importante, deben tener en la toma respectiva una *fe* que prime o penalizace según el caso, los efectos de la calidad en la cantidad. La diferencia en los costos de tratamiento para el agua con distinto origen normalmente es un dato relativamente fácil de obtener.

5.4. Uso de MEvalGes

El manual de uso [Collazos, 2004] explica detalladamente el funcionamiento de este programa. A modo de breve resumen, ha de mencionarse que la ejecución del mismo necesita de 4 archivos de texto que contienen los datos de entrada:

- el archivo de datos físicos del sistema, creado por SimWin. Este archivo define el sistema, los vínculos entre los elementos y las propiedades físicas de cada elemento.
- el archivo de datos de aportaciones del sistema, necesario para SimGes.
- el archivo de datos de propiedades económicas de cada elemento. Este archivo contiene la función que relaciona la cantidad de agua asignada a cada elemento con el beneficio neto que produce, y la tasa de actualización a emplear.
- el archivo de datos de los casos modificados: clase de cálculo, elementos en los cuales se introduce la perturbación, magnitud de la perturbación, etc.

Los primeros dos archivos (datos físicos y aportaciones) ya se tienen si se dispone del modelo en SimGes del SRH.

Los últimos dos archivos se pueden construir en un procesador de textos y ejecutar el programa en DOS sin más; o usar la interfaz Gestal para realizar ambas tareas con más comodidad, de la forma que se describe en la sección siguiente.

En el Anexo E se describe la estructura de los archivos de datos anteriores.

5.5. Gestal

Gestal es la interfaz gráfica creada en Visual Basic [Cornell, 1999] para facilitar el uso de los programas EvalGes y MEvalGes. Ambos programas trabajan a partir de un esquema del SRH previamente creado en SimWin, de forma compatible con ese programa.

Gestal permite realizar tres acciones:

- introducir datos económicos de los elementos.
- preparar los archivos previos y ejecutar MEvalGes.
- graficar los resultados obtenidos con MEvalGes.

Para comenzar se abre un esquema de SimWin (archivo *.re2). La carpeta donde se encuentra este archivo será la carpeta de trabajo, donde se buscan los archivos de datos y se escriben los archivos de resultados. Al abrir un archivo, el esquema del sistema se despliega en la ventana principal (Figura 5.7).

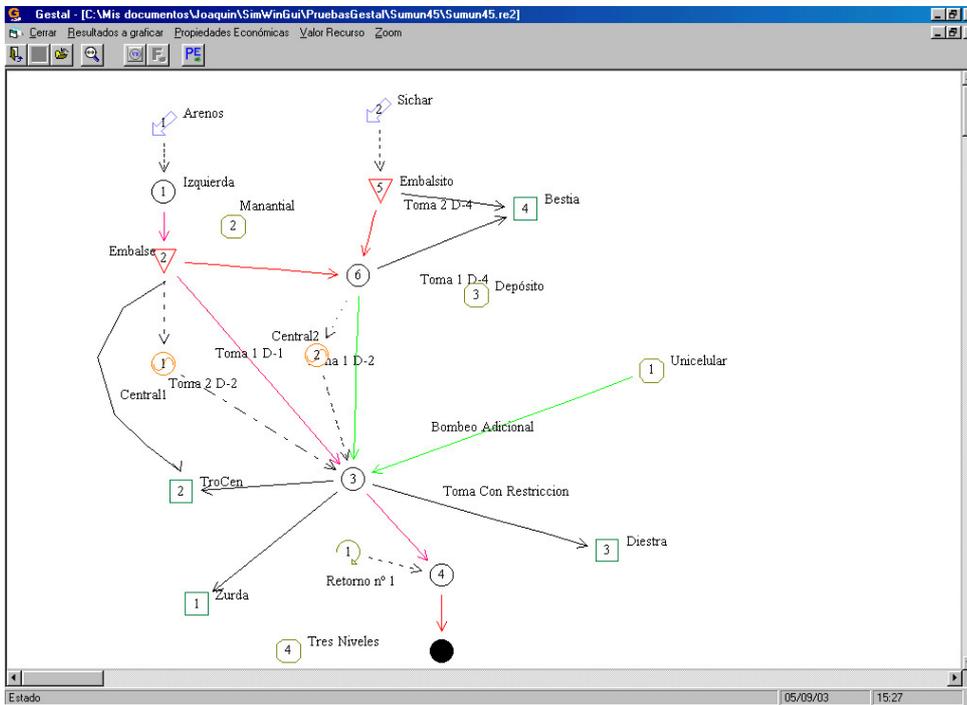


Figura 5.7: Ventana principal de Gestal, con el esquema de un SRH.

5.5.1. Introducir datos económicos

Esta utilidad facilita la introducción y la visualización de la función económica de los elementos del esquema. Todos los elementos de un esquema de SimWin pueden tener asociada una (y sólo una) función económica. Esta función tiene la siguiente forma polinómica:

$$fe = a + b \cdot x + c \cdot x^2 + (d \cdot x)/(x + e) + f \cdot x^g$$

Los parámetros de la función económica (a , b , c , d , e , f , y g) pueden ser los mismos para todos los meses, o distintos de un mes a otro.

El menú Propiedades Económicas de la ventana principal abre la ventana de la Figura 5.8. Ahí se puede seleccionar, uno a uno, todos los elementos del sistema e introducir los parámetros económicos antes mencionados. Previamente se ha buscado el archivo `Ecuaprecio.txt` en la carpeta de trabajo; si existe se lee y muestra los valores en esta ventana.

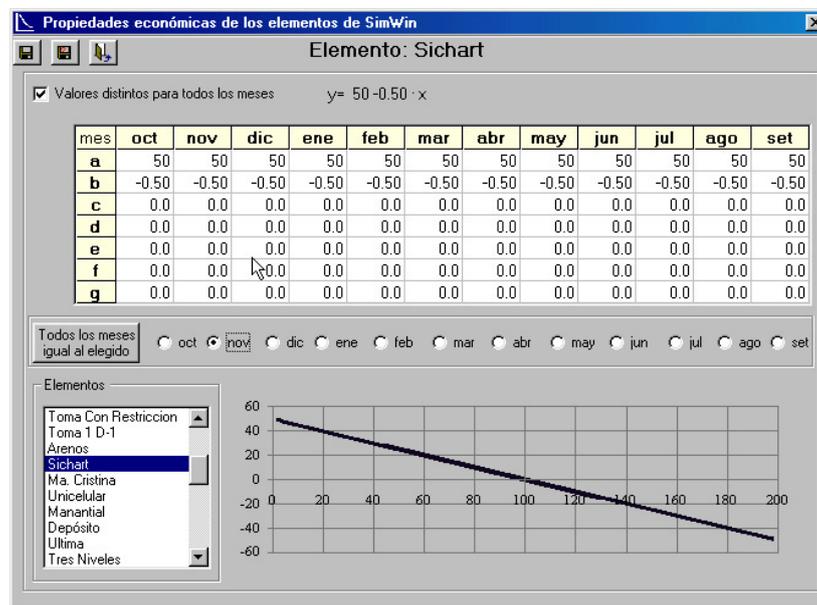


Figura 5.8: Ventana de la base de datos económicos.

Al guardar los valores introducidos, se actualiza el archivo `Ecuaprecio.txt`.

5.5.2. Calcular el valor del indicador

Otra utilidad de Gestal es la de construir el archivo de datos necesario para la ejecución del programa MEvalGes, y así calcular el valor del recurso en ciertos nudos del esquema. Para ello primeramente se seleccionan gráficamente los elementos (nudos para calcular el pvmr, o usos, embalses o conducciones para calcular el pcmr) en los cuales se desea realizar el cálculo. En la barra de herramientas de la Figura 5.7 hay un visor donde aparecen los números de los elementos elegidos.

Cuando se seleccionaron todos los elementos de interés, se introduce el valor de flujo a agregar (o sacar, si el signo es negativo), en la ventana que muestra la Figura 5.9.

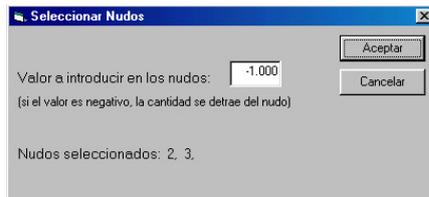


Figura 5.9: Ventana para introducir el Δ de volumen en el cálculo del indicador.

Como se calculará un valor marginal, el valor de Δ a introducir debe ser tal que, sin ser demasiado grande, provoque modificaciones detectables en la asignación. Un buen punto de partida es un orden de magnitud menor a los flujos del caso base. A lo sumo hará falta un par de pruebas para encontrar un valor adecuado.

Finalizado esto, se crea el archivo `DatosValRec.txt` que necesita el programa MEvalGes. Entonces se está en condiciones de ejecutar el mencionado programa, lo cual se hace mediante un icono desde Gestal.

MEvalGes realiza múltiples simulaciones del sistema para todo el periodo de tiempo. Así, si se simulan 10 años, el modelo SimGes y EvalGes se han de ejecutar 120 veces por cada elemento en el que se ha de calcular el indicador. Entonces, para esquemas grandes, con muchos años a simular o con muchos elementos seleccionados simultáneamente el programa tarda cierto tiempo, durante el cual se ve la evolución de los cálculos en una pantalla de DOS.

5.5.3. Graficar los resultados

Para un caso que se ha resuelto, es posible ver los resultados obtenidos. Hay 3 tipos de resultados que se pueden visualizar gráficamente:

- resultados de flujo del caso base (los mismos que se ven en SimWin).
- resultados económicos del caso base.
- resultados de valor del recurso en los nudos elegidos.

Por ejemplo la Figura 5.10 muestra el almacenamiento en el caso base de un embalse, y la Figura 5.11 muestra el valor del recurso en un nudo.

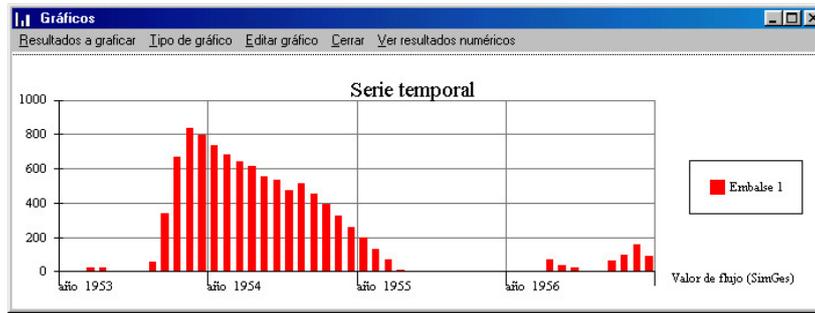


Figura 5.10: Resultado del volumen almacenado en un embalse.

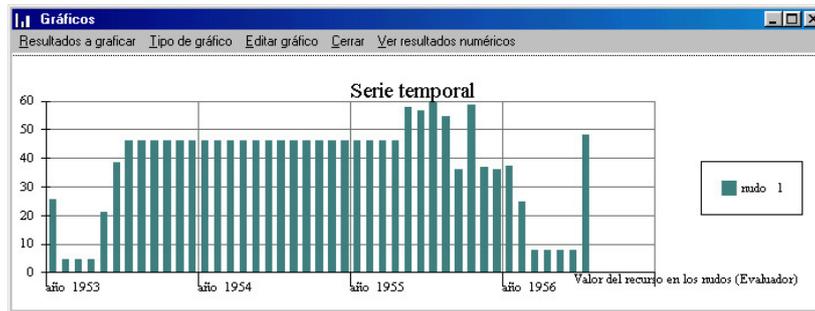


Figura 5.11: Resultado del pseudo-valor marginal del recurso en un nudo.

5.6. Comentarios finales acerca de MEvalGes

La metodología que se implementa en el programa MEvalGes presenta dos virtudes fundamentales:

- no pierde de vista la realidad actual de la gestión, sino que por el contrario, la toma como punto base, a partir del cual incorpora los aspectos económicos en la gestión del recurso.
- se aplica con modelos conocidos y ampliamente probados, por lo que su aplicación puede ser relativamente rápida, amén que se requieran estudios para mejorar los parámetros con que se alimenta el modelo.

5.7. Análisis de casos simples con MEvalGes

A continuación se presentan una serie de casos de ejemplo. Estos casos son lo suficientemente simples como para permitir:

- mostrar las relaciones cualitativas obtenidas con la metodología de múltiples simulaciones y evaluaciones de la gestión actual del sistema de recursos hídrico.
- comprender el funcionamiento del modelo MEvalGes, elaborar recomendaciones de uso, y explicar el por qué de los resultados.
- explorar el tipo de resultados que se pueden obtener del uso de este modelo.

También han servido para corregir errores y conseguir el correcto funcionamiento de este programa informático.

Como recomendación básica para obtener buenos resultados con MEvalGes, es conveniente que los elementos que contribuyen a la función objetivo en SimGes tengan una *fe* asociada; y que estas *fe* sean coherentes con las prioridades relativas de los elementos (que la *fe* de un elemento con prioridad 2 no esté por encima de la *fe* de un elemento con prioridad 1). De esta forma, los resultados saldrán “lógicos”; mientras que en caso contrario servirá para detectar incoherencias entre los datos económicos y el mecanismo de prioridades.

También se debe tener el cuenta que al utilizar un modelo de simulación (no de optimización), el volumen final de los embalses no necesariamente es igual al volumen inicial, porque el modelo no conoce cual será la aportación futura para realizar la mejor gestión. Una solución para este problema puede ser valorar económicamente el agua embalsada al inicio y al final de la simulación, para hacer un correcto balance económico; pero el valor del agua embalsada es uno de los resultados que se pueden obtener de la aplicación del modelo, y no se conoce *a priori*.

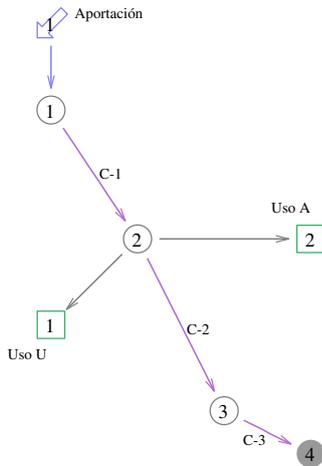
Una aclaración importante es que todos los casos presentados se resolvieron utilizando los costos ficticios por defecto de SimGes. Como se mencionó en la sección 5.1, estos coeficientes condicionan la gestión, de forma que se si cambiaran estos costos ficticios evidentemente cambiarían los resultados.

Los casos presentados en esta sección son los siguientes:

- Caso A2eva: se valora sólo un uso, y en otro sub-caso se valoran ambos usos.
- Caso B0eva: se reemplaza un nudo por un embalse de capacidad ilimitada.
- Caso B1eva: se impone un volumen mínimo en el tramo de río *C-2* en todos los meses del periodo.
- Caso B2eva: se limita la capacidad máxima de almacenamiento del *Embalse*.
- Caso C1eva: se valora el uso en el tramo de río *C-2* que tiene una restricción de volumen mínimo.
- Caso D1eva: se agrega un trasvase externo desde una cuenca vecina.
- Caso E1eva: se considera un retorno de uno de los usos, observándose una importante diferencia con el caso de referencia sin retorno. Por ello es fundamental una representación rigurosa del flujo de agua en el SRH.
- Caso F1eva: se agrega un nuevo uso aguas abajo del retorno, con igual prioridad que los otros usos ya instalados en el SRH.
- Caso G1eva: se incluye un acuífero unicelular en el esquema a modelar, observando la diferencia entre usos que se pueden abastecer del acuífero y los que no tienen esta posibilidad.
- Caso L1eva: se incrementa el volumen mínimo del embalse en cada uno de los meses del periodo.
- Caso M2eva: se incrementa el volumen mínimo de una conducción en todos los eneros, febreros, etc. del periodo simulado.
- Caso N1eva: se prueba el efecto de usar f_e anuales en lugar de f_e mensuales.
- Caso P1eva: enfoque estocástico usando muchas series hidrológicas sintéticas para obtener la probabilidad del pseudo-valor marginal del recurso.

5.7.1. Caso A2eva

Este caso consiste en aplicar MEvalGes al esquema de la Figura 5.12.



Características:

- periodo de tiempo: 48 meses.
- *uso U* es una demanda de 18 unidades constante en todos los meses, con coeficiente de consumo 1,0 y prioridad 2.
- *uso A* es una demanda de 50 unidades constante en todos los meses, con coeficiente de consumo 1,0 y prioridad 2.

Figura 5.12: Esquema del Caso A2eva.

Se ejecutó el programa con las aportaciones de la Figura 5.13.

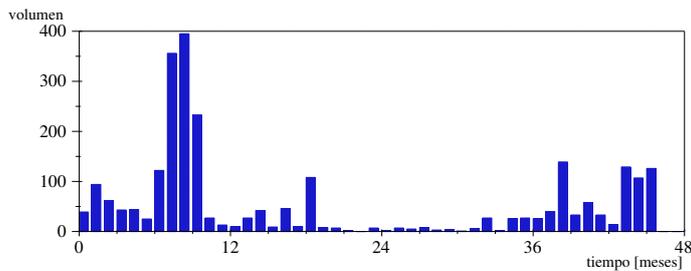


Figura 5.13: Aportación del Caso A2eva.

Flujos del caso base

Los flujos de algunos elementos del sistema obtenidos con SimGes para el caso base son los que muestran las Figuras 5.14 a 5.17 en la página siguiente. Estos flujos son los mismos en todos los sub-casos del grupo A2eva.

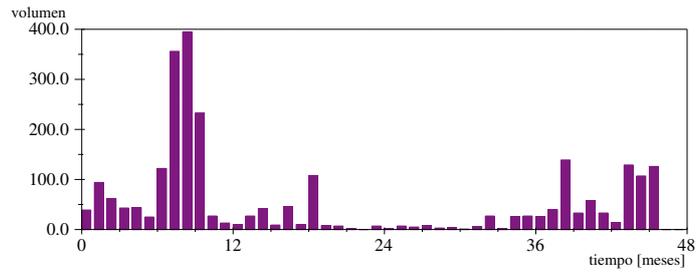


Figura 5.14: Flujo en C-1 del Caso A2eva.

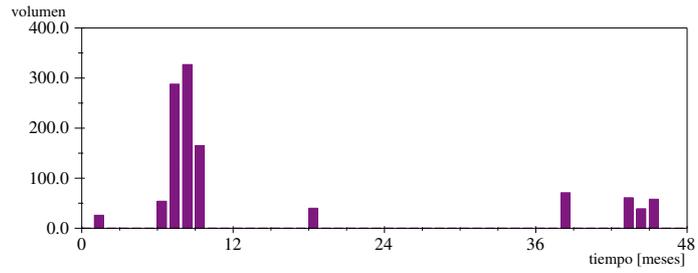


Figura 5.15: Flujo en C-2 y C-3 del Caso A2eva.

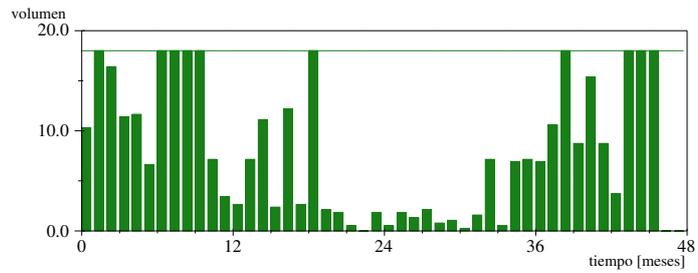


Figura 5.16: Suministro al Uso U del Caso A2eva.

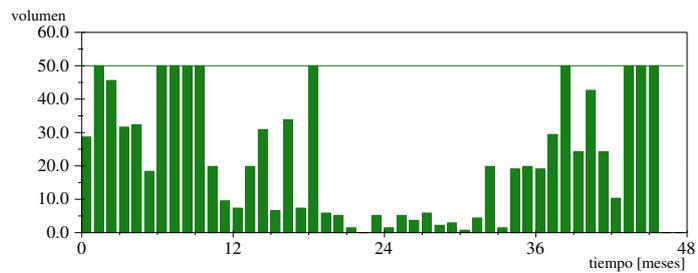


Figura 5.17: Suministro al uso A del Caso A2eva.

Caso A2eva-1

En este caso, el único elemento con función económica (fe) es $Uso U$ (Figura 5.18), con ecuación:

$$p_U = 90 - 0,5 \cdot x_U$$

Se usó un $\Delta = -0,1$, que significa que se está de trayendo $-0,1$, o lo que es lo mismo, introduciendo $0,1$ en el nudo 2.

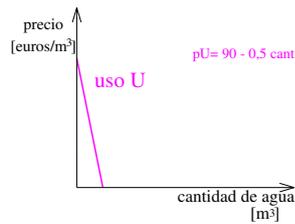


Figura 5.18: Curvas de demanda del Caso A2eva-1.

La Figura 5.19 muestra el beneficio económico o excedente proveniente del $uso U$ en unidades monetarias (UM). Se puede observar la no-linealidad del resultado económico: el cociente de suministros $mes_1/mes_2 = 0,57$, mientras que el cociente de beneficios $mes_1/mes_2 = 0,81$.

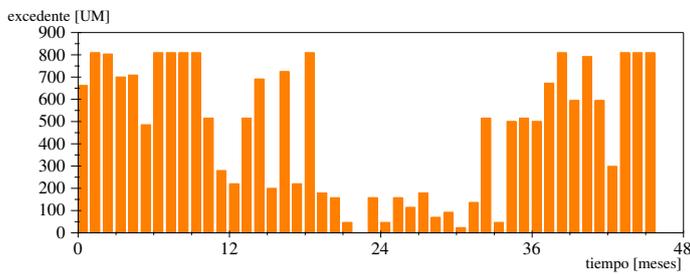


Figura 5.19: Excedente económico del Caso A2eva-1.

La Figura 5.20 muestra el pseudo-valor marginal del recurso en esta ejecución. Como era de esperar, los meses 2, 7, 8, etc. en los que las demandas se abastecen completamente, el pseudo-valor del recurso es nulo.

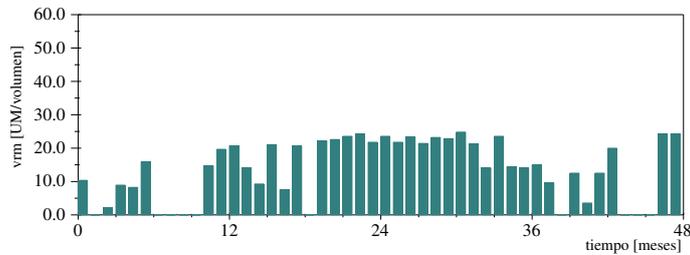


Figura 5.20: Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 2 del Caso A2eva-1.

Caso A2eva-2

En este caso agregamos una curva de demanda para *uso A* (Figura 5.21).

Los flujos del sistema no cambian (Figuras 5.14 a 5.17); pero sí el excedente económico y el pseudo-valor marginal del recurso.

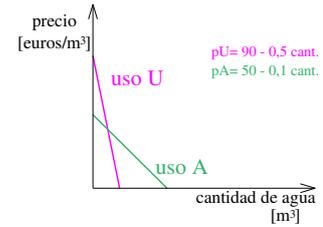


Figura 5.21: Curvas de demanda del Caso A2eva-2.

La Figura 5.22 muestra el beneficio económico o excedente de los 2 usos: las barras naranja claro son del *uso U* (coincidente con la Figura 5.19) y las barras marrón oscuro del *uso A*. El beneficio total del sistema bajo las condiciones de estudio será la suma de ambos beneficios parciales.

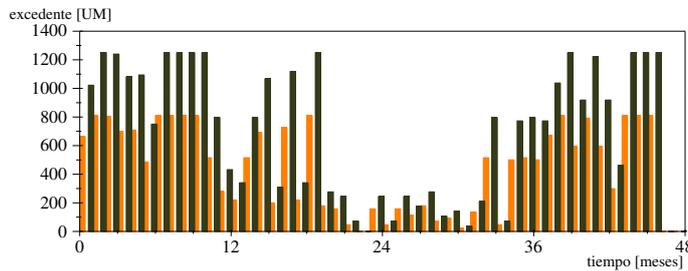


Figura 5.22: Excedente económico del Caso A2eva-2.

La Figura 5.23 —por comparación con el caso previo— permite observar que el pseudo-valor marginal del recurso pasó de un máximo de 24 a tener un máximo de 62 en este caso.

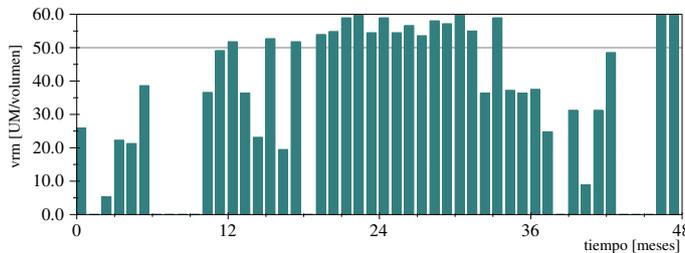
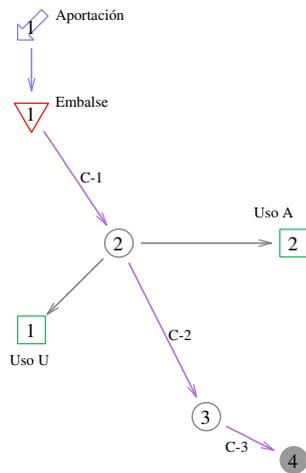


Figura 5.23: Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 2 del Caso A2eva-2.

Puede concluirse de forma general, que **al agregar valoraciones, el pseudo-valor marginal del recurso se incrementa.**

5.7.2. Caso B0eva

Con este caso se pretende ver el efecto que tiene la regulación en los indicadores económicos calculados. Este caso es similar al Caso A2eva-2, pero se **reemplazó el nudo 1 por un embalse**, tal como muestra la Figura 5.24.



Características:

- el embalse tiene $V_{max} = \infty$, $V_{obj} = 70$ y $V_{min} = 0$ en todos los meses, y $V_{ini} = 0$.
- los elementos que contribuyen a la función objetivo son $Uso A$ y $Uso U$, y sus curvas de demanda son las mismas del Caso A2eva-2 (Figura 5.21).

Figura 5.24: Esquema del Caso B1eva.

Los resultados se ven en las Figuras 5.27 y 5.29. Los flujos en las conducciones $C-2$ y $C-3$ no se han graficado porque son nulos.

Caso A2eva-2

(no hay embalse)

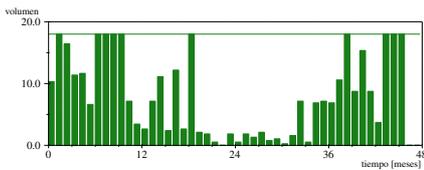


Figura 5.25: Suministro a Uso U, CasoA2eva-2.

Caso B0eva

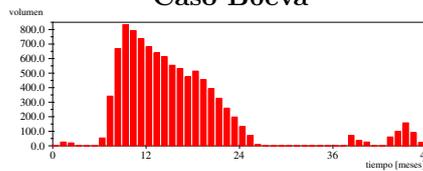


Figura 5.26: Volumen final almacenado en el embalse, Caso B0eva.

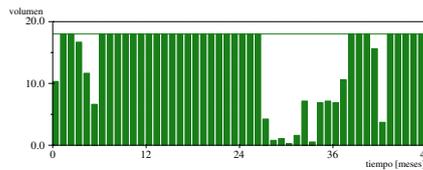


Figura 5.27: Suministro al Uso U, Caso B0eva.

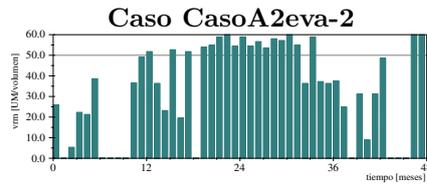


Figura 5.28: Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 2, Caso CasoA2eva-2.

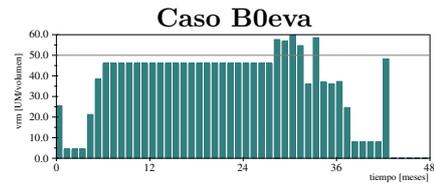


Figura 5.29: Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 2, Caso B0eva.

Análisis

1. Como *Uso A* tiene la misma prioridad que el *Uso U*, las gráficas de suministro son semejantes, o sea que el suministro al *Uso A* es proporcional al suministro al *Uso U* que muestra la Figura 5.27.
2. Lo primero que sorprende es que para los meses 7 a 27 se abastece completamente a las demandas, y sin embargo el pseudo-valor marginal del recurso no es nulo como en el Caso A2 (recordar las Figuras 5.19 y 5.20). **Esto es porque, independientemente de en qué intervalo se incorpore la unidad adicional (Δ) en el nudo 2, se guarda una cantidad igual (Δ) en el embalse, que se entregará siempre en el periodo 28, que es el primer periodo en que no se puede satisfacer completamente las demandas. Esto sucede en todos los subgrupos de intervalos en los que se almacena agua en el embalse.**

Como situación extrema de lo comentado anteriormente, el pseudo-valor marginal del recurso para los últimos meses es nulo, porque se termina el periodo de simulación con un cierto volumen almacenado, y sin que se pueda aprovechar para mejorar el suministro a los usos, puesto que están completamente abastecidos. Esto puede tener 2 soluciones: a) valorar el agua almacenada en los embalses b) Considerar sólo la serie de pseudo-valor marginal del recurso hasta el último periodo con déficit.

Evidentemente la existencia del embalse permite mejorar el suministro a los usos (comparar Figura 5.16 con la Figura 5.27).

En cuanto al pseudo-valor marginal del recurso, comparando la Figura 5.23 con la Figura 5.29 se ve que se estabiliza el valor, a la vez que disminuye levemente.

Esta comparación del efecto del embalse es muy importante.

5.7.3. Caso B1eva

Este caso es similar al Caso B0eva, pero la **conducción C-3 tiene un valor mínimo de 10 unidades en todos los meses**. El esquema es el mismo del caso de referencia (Figura 5.24).

Esta nueva condición sí que modifica el flujo en los distintos elementos, dado que SimGes atiende en forma prioritaria el caudal mínimo en C-3. Los resultados de flujos se ven en las Figuras 5.34 a 5.36, y los resultados económicos en la Figura 5.37.

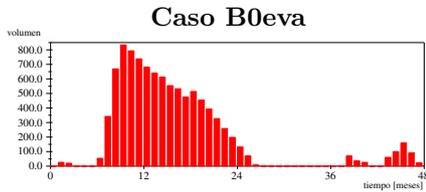


Figura 5.30: Volumen final almacenado en el embalse, Caso B0eva.

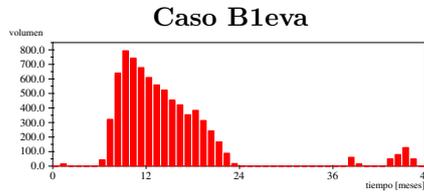


Figura 5.34: Volumen final almacenado en el embalse, Caso B1eva.

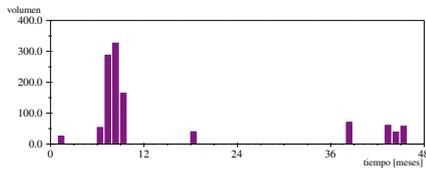


Figura 5.31: Flujo en C-3, Caso B0eva.

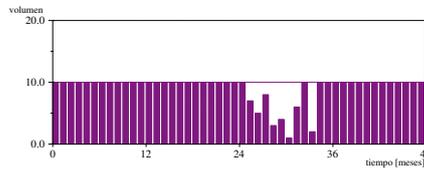


Figura 5.35: Flujo en C-2 y C-3, Caso B1eva.

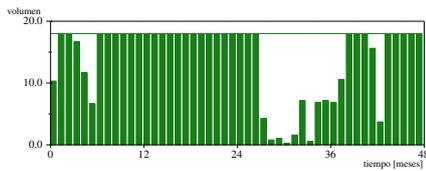


Figura 5.32: Suministro al Uso U, Caso B0eva.

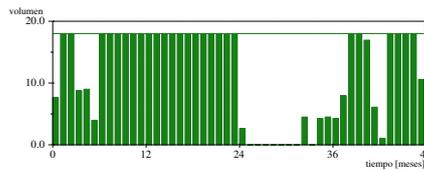


Figura 5.36: Suministro a Uso U, Caso B1eva.

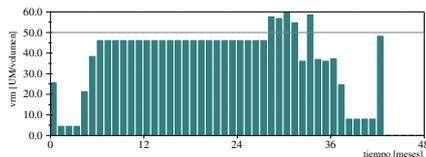


Figura 5.33: Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 2, Caso B0eva.

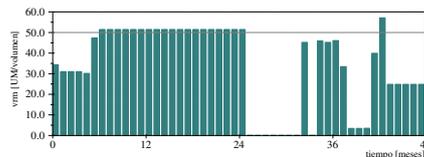


Figura 5.37: Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 2, Caso B1eva.

Análisis

1. El caudal mínimo de C-3 quita parte del agua que antes se destinaba a los usos U y uso A (meses 1 a 6), lo que provoca el aumento del pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 2, como era de esperar.
2. Cuando no se puede satisfacer siquiera el caudal mínimo de C-3 (meses 26 a 31), el pseudo-valor marginal del recurso es nulo, porque no hay diferencia entre la simulación base y la modificada en cuanto a los resultados económicos, dado que el volumen diferencial agregado se va por C-3, que no tiene f_e asociada.

5.7.4. Caso B2eva

Este caso es similar al Caso B1eva, pero el embalse tiene ahora una capacidad máxima menor: de 600 unidades en todos los meses. El esquema sigue siendo el mismo que el del Caso B0eva de la Figura 5.24.

Los resultados de flujos se ven en las Figuras 5.42 a 5.44.

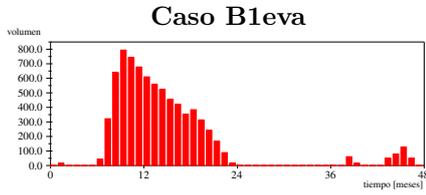


Figura 5.38: Volumen final almacenado en el embalse, Caso B1eva.

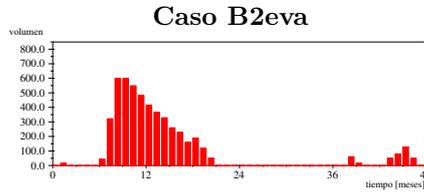


Figura 5.42: Volumen final almacenado en el embalse, Caso B2eva.

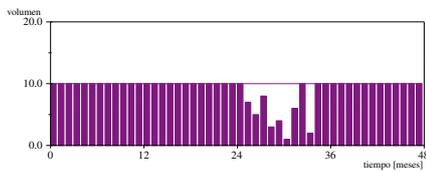


Figura 5.39: Flujo en C-2 y C-3, Caso B1eva.

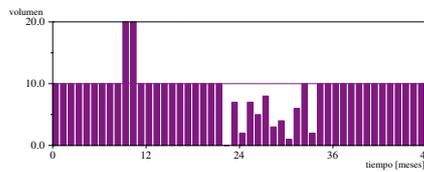


Figura 5.43: Flujo en C-3, Caso B2eva.

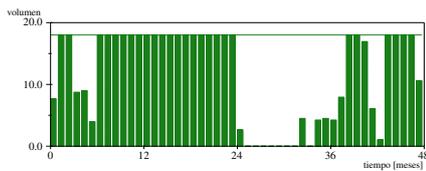


Figura 5.40: Suministro a Uso U, Caso B1eva.

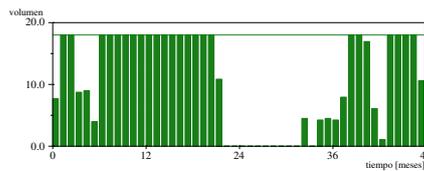


Figura 5.44: Suministro al Uso U, Caso B2eva.

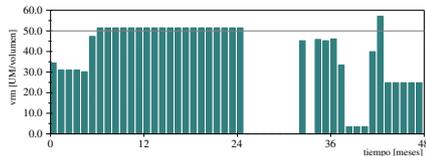


Figura 5.41: Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 2, Caso B1eva.

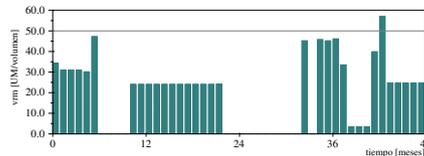


Figura 5.45: Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 2, Caso B2eva.

Análisis

1. Comparando con en Caso B1eva, se ve que en 2 meses del primer año el embalse alcanza el volumen máximo, por lo que el volumen por C-3 es mayor que las 10 unidades de caudal mínimo. Al tener limitado el volumen de almacenamiento los suministros a las demandas y al caudal mínimo son menores en la época de aportaciones bajas (meses 20 en adelante).
2. En los meses 7 a 10 (ambos incluidos) el pseudo-valor marginal del recurso es nulo, porque el volumen incorporado al sistema no aporta mejoras de suministro, ya que como el embalse alcanza el máximo almacenado tiene que verter agua que no produce beneficio económico en el sistema.

Distintas capacidades máximas del embalse

Repetiendo este caso varias veces más para distinta capacidad máxima del embalse, se obtienen los resultados de la Figuras 5.46 y 5.47.

V_{max}	Perj. Uso U	Perj. Uso A	Perj. Total
0	0	0	0
100	3218	4966	8184
200	4726	7293	12019
300	5697	8792	14489
400	6687	10319	17006
500	7602	11731	19333
600	8740	13487	22227
900	10708	16525	27233

Figura 5.46: Perjuicios evitados con distintos tamaños de embalse.

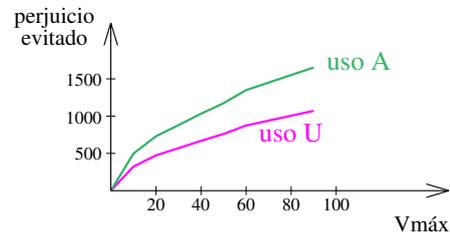


Figura 5.47: Perjuicios evitados con distintos tamaños de embalse.

Puede apreciarse con claridad que la relación entre el volumen máximo del embalse y los perjuicios en cada uso, y del perjuicio total es evidentemente no lineal.

Por comparación con el Caso B2 (de optimización), se ve que en este caso el crecimiento es más lento, porque la relación entre el volumen asignado a los dos usos no se modifica.

5.7.5. Caso C1eva

Este caso es similar al Caso B1eva: el esquema es el mismo, pero **en la conducción C-2 se valora un uso en el cauce**, (por ejemplo el uso para transporte fluvial), y por lo tanto este elemento tiene una curva de demanda asociada.

Características:

- el embalse tiene $V_{max} = \infty$, $V_{obj} = 70$ y $V_{min} = 0$ en todos los meses, y $V_{ini} = 0$.
- la conducción C-3 tiene un mínimo de 10 unidades en todos los meses.
- la conducción C-2 tiene una curva de demanda $p_{C-2} = 40 - 0,15 \cdot c$. Esta y las anteriores curvas de demanda se observan en la Figura 5.48.
- los elementos que contribuyen a la función objetivo son: *Uso U*, *Uso A* y *C-2*.

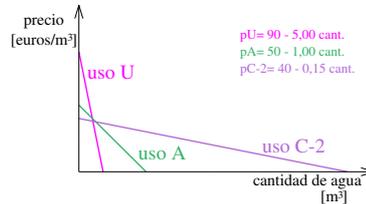


Figura 5.48: Curvas de demandas del Caso C1eva.

Como no hay cambios en el esquema ni en las prioridades respecto al Caso B1eva, los flujos por los elementos son los mismos que en el mencionado caso (Figuras 5.34 a 5.36).

En cuanto a los resultados económicos, se muestra en la Figura 5.50.

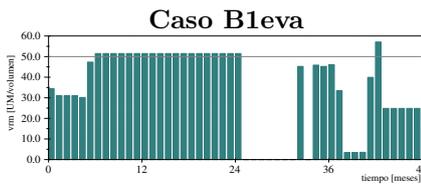


Figura 5.49: Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 2, Caso B1eva.

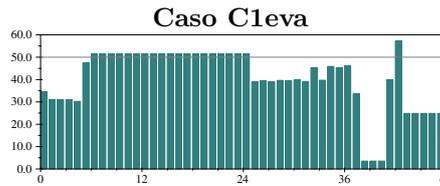


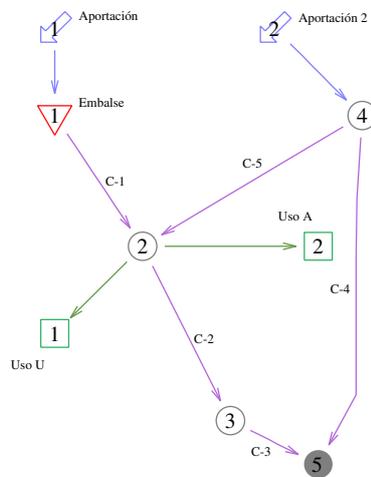
Figura 5.50: Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 2, Caso C1eva.

Análisis

1. La diferencia se presenta en los meses que en el Caso B1eva no se cumple con el volumen mínimo en C-3 (Figura 5.35): meses 26 a 32 y 34, que ahora tienen un valor positivo, debido a la curva de demanda de la conducción C-2.
2. Para el resto de los meses se obtienen los mismos valores que para el caso de comparación.
3. El resultado económico del sistema (suma agregada de las áreas bajo las *fe* hasta el nivel de suministro) es ahora de 86583 unidades monetarias, mayor que en el caso de referencia.

5.7.6. Caso D1eva

A partir del Caso C1eva, se agregó un trasvase (C-5) desde un río próximo al nudo 2. El nuevo esquema es el de la Figura 5.51. Se quiere estudiar el efecto del trasvase.



Características:

- el embalse tiene $V_{max} = \infty$, $V_{obj} = 70$ y $V_{min} = 0$ en todos los meses, y $V_{ini} = 0$.
- la conducción C-3 tiene un mínimo de 10 unidades en todos los meses.
- los elementos que contribuyen a la función objetivo son: *Uso U*, *Uso A*, y C-2, y las curvas de demanda son las de la Figura 5.48.
- la *Aportación 2* es igual a *Aportación 1*.
- la conducción C-5 tiene un máximo de 12 unidades en cada periodo, y no tiene asociado ninguna *fe* de costo o beneficio.

Figura 5.51: Esquema del Caso D1eva.

Esta nueva condición sí que modifica el flujo en los distintos elementos. Al tener una entrada de agua por el trasvase el embalse puede almacenar más agua ($V_{max} = 1080$), y por ende mejorar el suministro a los dos usos.

Los resultados de los flujos más significativos se presentan en la Figura 5.52 y en la 5.55 a 5.56.

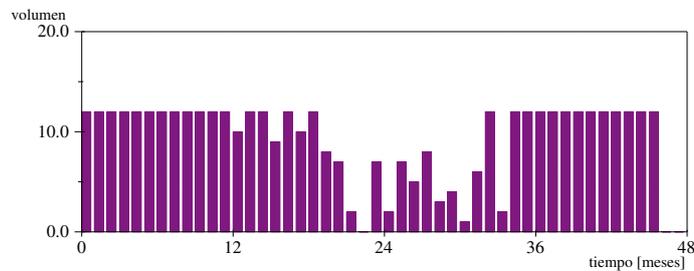


Figura 5.52: Flujo en C-5, Caso D1eva.

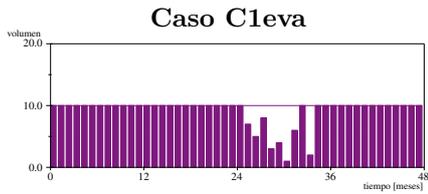


Figura 5.53: Flujo en C-2 y C-3, Caso C1eva.

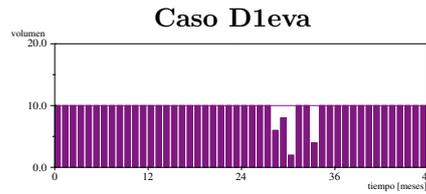


Figura 5.55: Flujo en C-2 y C-3, Caso D1eva.

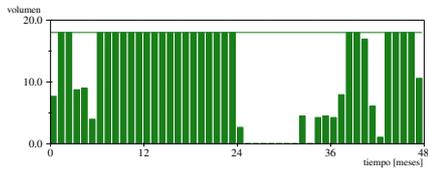


Figura 5.54: Suministro a Uso U, Caso C1eva.

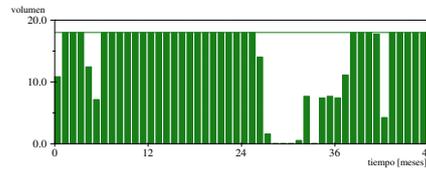


Figura 5.56: Suministro a Uso U, Caso D1eva.

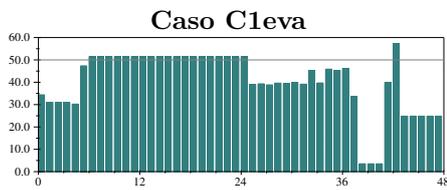


Figura 5.57: Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 2, Caso C1eva.

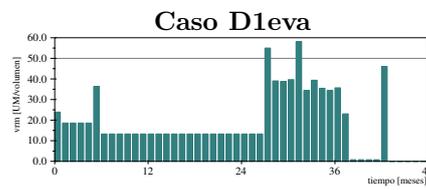


Figura 5.58: Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 2, Caso D1eva.

Análisis

1. Tal como era de esperar, la transferencia de recursos hace bajar el pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 2 en todos los meses (Figura 5.58).
2. Los meses en los que el volumen trasvasado no llega al máximo (Figura 5.52), y que los usos no pueden ser completamente satisfechos, es porque el volumen de *Aportación 2* es insuficiente.
3. El resultado económico del sistema es de 99390 unidades monetarias. Comparando con el caso de referencia ha habido un aumento, como era de esperar a consecuencia de la mejora en los suministros a los elementos valorados con una *fe*. Simplificadamente, en el análisis económico, agua es dinero.

5.7.7. Caso E1eva

A partir del Caso D1eva, se **agregó un retorno** del *Uso U* al nudo 3. Puede imaginarse que representa un cambio en la forma de utilizar el agua que disminuye el consumo. El nuevo esquema es el de la Figura 5.59.

Características:

- todas las condiciones del Caso D1eva, más:
- el *Uso U* tiene ahora un coeficiente de retorno de 0,5. Este volumen lo recoge el retorno 1 y lo entrega en el nudo 3.

El retorno modifica el flujo en los distintos elementos, ya que hay más agua disponible en el sistema que en el caso de comparación (lo que ahora circula por el retorno en el Caso D1eva se perdía).

En la Figura 5.62, se ve que el volumen que circula por *C-2* ha disminuido bastante respecto al caso de comparación (en el Caso D1eva $C-2 = C-3$, Figura 5.55), ya que ahora se aprovechan los retonos para satisfacer el volumen mínimo en la conducción *C-3*.

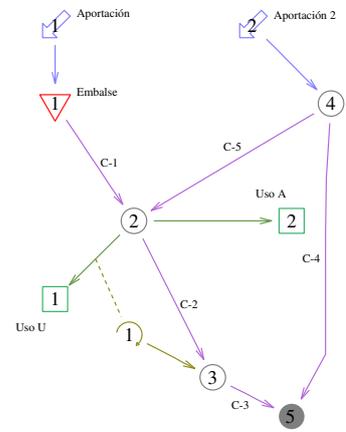


Figura 5.59: Esquema del Caso E1eva.

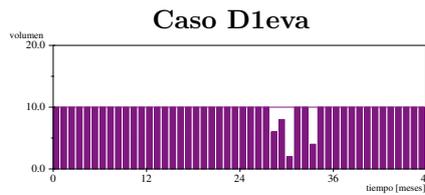


Figura 5.60: Flujo en C-2 y C-3, Caso D1eva.

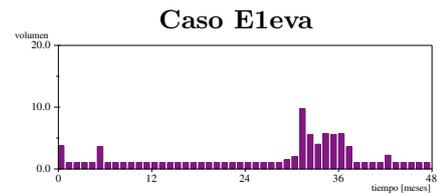


Figura 5.62: Flujo en C-2, Caso E1eva.

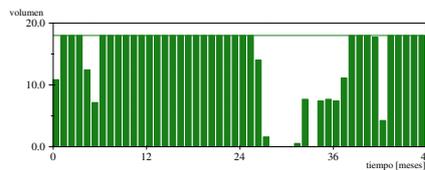


Figura 5.61: Suministro a Uso U, Caso D1eva.

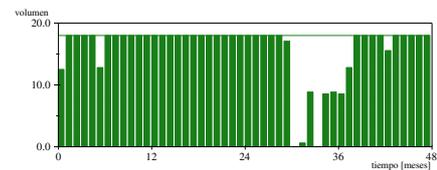


Figura 5.63: Suministro a Uso U, Caso E1eva.

Comparando la Figura 5.63 con la Figura 5.56 se aprecia la mejora en el suministro a *Uso U*.

En cuanto a los resultados económicos, se presenta la Figura 5.65.

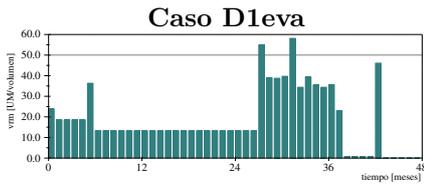


Figura 5.64: Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 2, Caso D1eva.

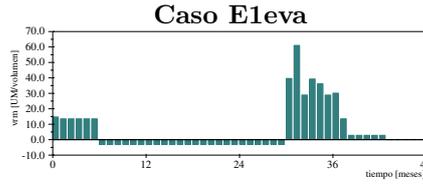


Figura 5.65: Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 2, Caso E1eva.

Análisis

1. Los resultados iniciales no fueron los esperados, porque con la cantidad de iteraciones por defecto la convergencia entre demanda-retorno no era buena. Por lo tanto se recomienda que **siempre que haya retornos aumentar la cantidad de iteraciones mínimas**.
2. Observesé el siguiente efecto preocupante:
 - en el mes 1 el pseudo-valor marginal del recurso depende sólo de la disponibilidad en ese mismo mes.
 - en los meses 2 a 6, el pseudo-valor marginal del recurso depende de la carencia en el mes 6. Si en lugar de dar a *uso* U 12,81 unidades hubiera dado 0,61 unidades, el pseudo-valor marginal del recurso hubiera sido mayor de 60, como el máximo de la Figura 5.65.
3. Los valores negativos se debe a lo siguiente: el volumen introducido artificialmente en el nudo 2 hace que se aumente el suministro a las demandas, lo que produce un aumento del retorno, lo que produce —siempre con los criterios de SimGes— una reducción de igual magnitud en el volumen que circula por $C-2$. Como hay una *fe* asociada a $C-2$, las pérdidas en la conducción son mayores que la ganancia en las demandas, y por eso el resultado es negativo.
4. Es muy interesante destacar la influencia de la representación realista del recurso, conseguida mediante el retorno

5.7.8. Caso F1eva

A partir del Caso E1eva, se agregó un nuevo uso aguas abajo de los usos anteriores: *Uso U2*. El nuevo esquema es el de la Figura 5.66.

Características:

- todas las condiciones del Caso E1eva, más:
 - *uso U2* es una demanda de 18 unidades en todos los meses (igual que *uso U*), con coeficiente de consumo 0,7 y prioridad 2 (igual prioridad que las otras demandas).
 - los elementos que contribuyen a la función objetivo son los mismos de antes: *Uso U*, *Uso A* y *C-2*, y las curvas de demanda son las de la Figura 5.48.

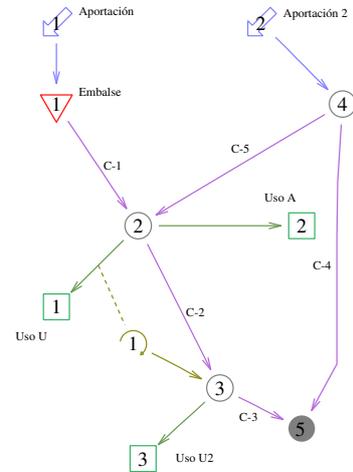


Figura 5.66: Esquema del Caso F1eva.

Los flujos cambian, y resultados se ven en las Figuras 5.69 y 5.70.

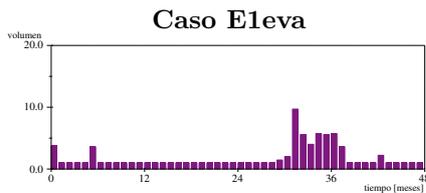


Figura 5.67: Flujo en C-2, Caso E1eva.

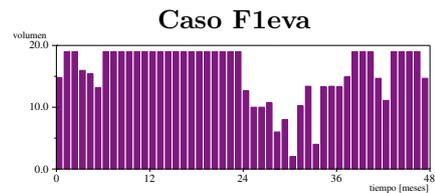


Figura 5.69: Flujo en C-2, Caso F1eva.

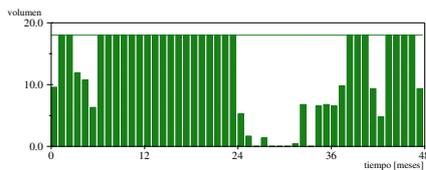


Figura 5.68: Suministro a Uso U, Caso E1eva.

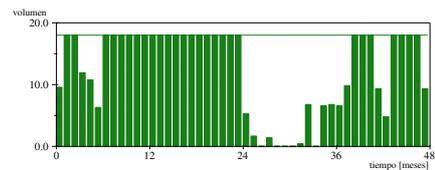


Figura 5.70: Suministro a Uso U, Caso F1eva.

En cuanto a los resultados económicos, se presentan las Figuras 5.71 y 5.72.

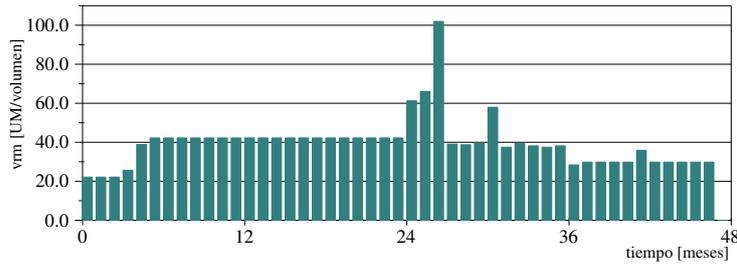


Figura 5.71: Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 2, Caso F1eva.

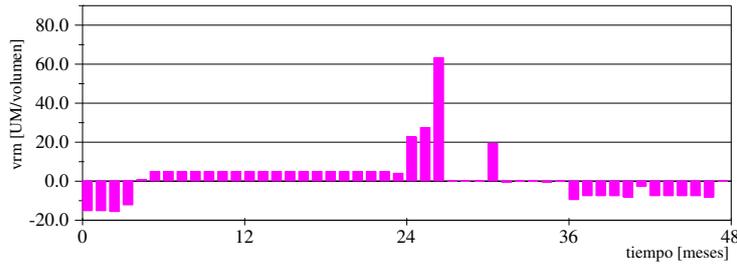


Figura 5.72: Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 3, Caso F1eva.

Análisis

1. El suministro a *Uso U* y a *Uso A* empeora (comparar Figura 5.70 con 5.68) debido a la entrada del nuevo usuario al sistema; a la vez que aumenta el volumen por *C-2*, necesario para llevar el agua al *Uso U2* de aguas abajo.
2. Nuevamente aumenta el pseudo-valor marginal del recurso a consecuencia de agregar una nueva valoración en un elemento del sistema.
3. En pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 3 es menor que en el nudo 2. Ambos gráficos tiene una forma similar; probando se halló la relación: $pvr_2 \sim 37 + pvr_3$. Esto permite concluir que de forma general, **el valor marginal del recurso aguas arriba siempre será igual o mayor que aguas abajo.**
4. Los valores negativos que en principio pueden resultar extraños, se deben a que no hay valoración económica del nuevo uso *Uso U2*. Al agregar una unidad en el nudo 3, SimGes aumenta la asignación a los usos de aguas arriba y disminuye el volumen por *C-2*; y resulta que el perjuicio de la disminución de los flujos por *C-2* es mayor que los beneficios de aumentar la asignación a *Uso U* y *Uso A*.

5.7.9. Caso G1eva

A partir del Caso F1eva, se agregó un acuífero unicelular, como puede verse en la Figura 5.73. Las características de este caso son las siguientes:

- *uso U*:
 - volumen requerido (máximo)= 18, prioridad 2.
 - $Coeff.Ret.U_{soU} = 0,5$; $Coeff.Cons.U_{soU} = 0,1$ y las filtraciones profundas (un 0,4%) van al acuífero *Unicelular*.
 - la función económica es $p_U = 90,0 - 5,0 \cdot x_U$.
- *uso U2*:
 - volumen requerido (máximo)= 18, prioridad 2.
 - $Coeff.Ret.U_{soU} = 0,0$; $Coeff.Cons.U_{soU} = 1,0$ y por lo tanto no hay filtraciones profundas.
 - autorizado a bombear del acuífero *Unicelular* sin limitación en el volumen.
 - la función económica es $p_{U2} = 90,0 - 5,0 \cdot x_{U2}$ (igual que la del *Uso U*).
 - función económica del bombeo a la demanda: $p_b = -2,0 \cdot prof$.
- *uso A*:
 - volumen requerido (máximo)= 50, prioridad 2.
 - $Coeff.Ret.U_{soU} = 0,0$; $Coeff.Cons.U_{soU} = 1,0$ y no hay filtraciones profundas.
 - la función económica es $p_A = 50,0 - 1,0 \cdot x_A$.
- *Unicelular*:
 - acuífero tipo unicelular, con $\alpha = 0,2$.
 - la ecuación volumen-profundidad es $prof = 26,0 - 0,15 \cdot V_{Unicelular}$.
- *uso C2*:
 - volumen mínimo= 10, con prioridad 0.
 - la función económica es $p_{C2} = 40,0 - 0,15 \cdot x_U$.
- *uso C3*:
 - volumen mínimo= 10, con prioridad 0.
 - sin función económica.

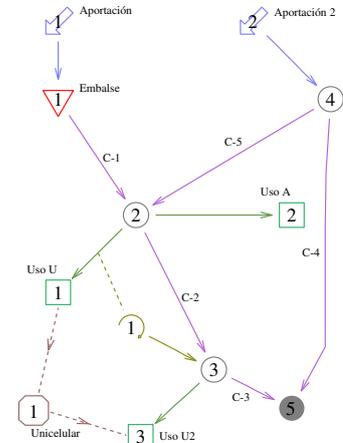


Figura 5.73: Esquema del Caso G1eva.

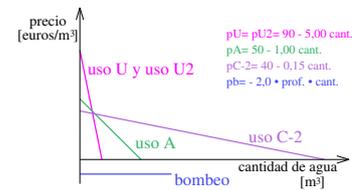


Figura 5.74: Funciones económicas del Caso G1eva.

Ahora el *Uso 2* resulta completamente abastecido, porque bombea agua del acuífero (Figura 5.75), en contraposición con *Uso 2* que no puede hacerlo. Sin embargo esta

mejora tiene un costo que depende del volumen almacenado en el acuífero (Figura 5.76).

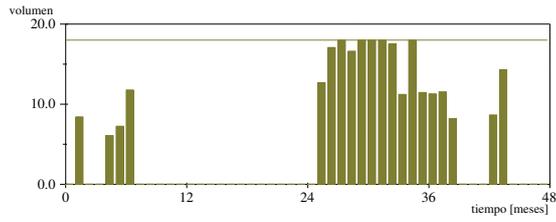


Figura 5.75: Bombeos al Uso U2, Caso G1eva.

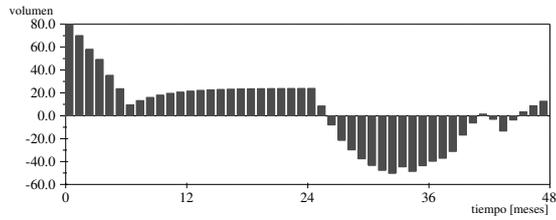


Figura 5.76: Volumen del acuífero Unicelular (por superposición), Caso G1eva.

En cuanto a los resultados económicos, se presentan las Figuras 5.77 y 5.78.

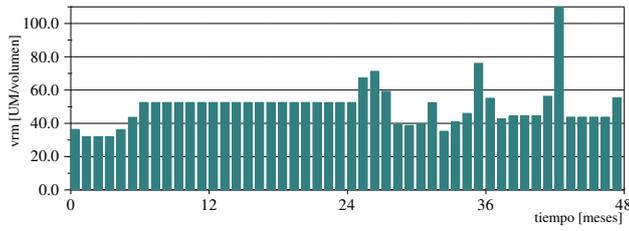


Figura 5.77: Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 2, Caso G1eva.

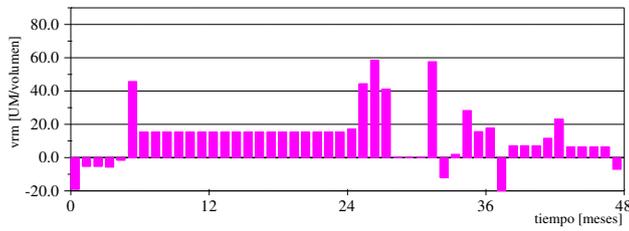


Figura 5.78: Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 3, Caso G1eva.

Análisis

1. Los valores del recurso resultan siempre superiores a los del caso de referencia (ver Figuras 5.71 y 5.72) porque el agua adicional tiene un doble efecto: mejora el suministro y evita costos de bombeo.
2. Otra comparación interesante es el beneficio neto de los usos *Uso U* y *Uso U2*, que requieren igual volumen. El primero se abastece sólo con agua superficial, mientras que el segundo puede complementarse con agua subterránea. Se ve en la Figura 5.79 que la suma de los beneficios y los costos de bombeo para el *Uso U2* resulta menor (peor) que el resultado económico del uso *Uso U1*.

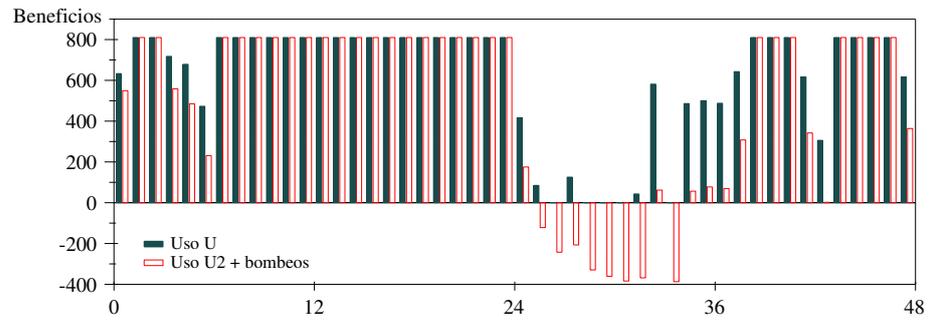


Figura 5.79: Valor económico neto de Uso U y Uso U2, Caso G1eva.

5.7.10. Caso L1eva

Este caso es similar al Caso B2eva, salvo que en lugar de estudiar el pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 2, ahora se estudia el efecto económico de **incrementar el volumen mínimo al embalse**. Δ significa ahora disminución de la restricción de V_{min} en el embalse. En este ejemplo se usó $\Delta = -2$ (o sea un incremento de 2 unidades).

En cada simulación modificada el V_{min} se modifica sólo en el mes bajo análisis, volviendo a adoptar el valor primigenio el mes siguiente y todos los restantes.

Las Figuras 5.80 y 5.81 repiten los flujos del Caso B2eva en elementos que interesan para el análisis. Seguidamente, la Figura 5.83 muestra los resultados económicos de este caso.

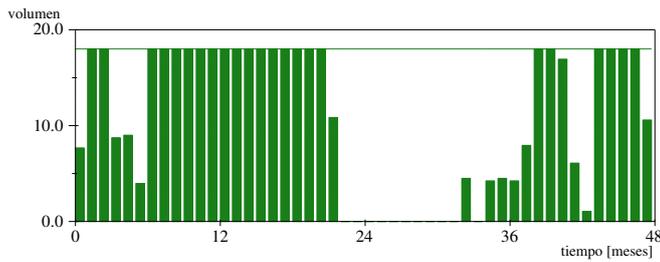


Figura 5.80: Suministro a Uso U, Caso L1eva.

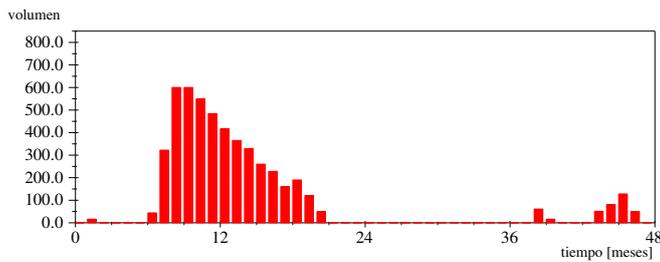


Figura 5.81: Volumen final almacenado en el embalse, Caso L1eva.

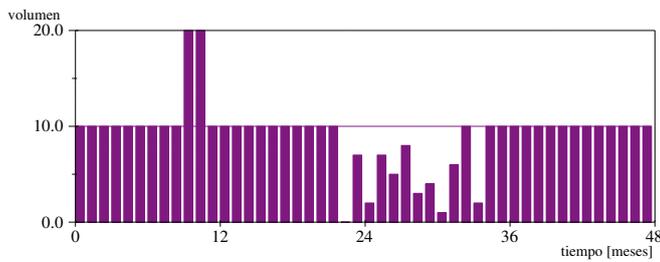


Figura 5.82: Flujo en C-3, Caso L1eva.

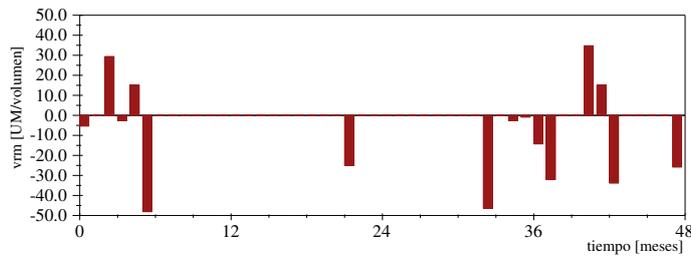


Figura 5.83: Pseudo-costo de la restricción de V_{min} en el embalse, Caso L1eva.

Análisis

1. Cuando el volumen embalsado al final del intervalo es mayor que $V_{min} + \Delta$, la modificación del límite es inoperante, por lo cual el pseudo-costo de la restricción es (y debe ser) nulo.
2. En los meses en los cuales no se alcanza a satisfacer el volumen mínimo en $C-3$, como en los meses 23 a 32 y 34 (Figura 5.82), también el pseudo-costo de la restricción es nulo, porque la modificación realizada al volumen embalsado sólo afecta a $C-3$ (que no tiene fe); al tiempo que el suministro a las demandas no cambia y sigue siendo nulo.
3. En los otros intervalos analizados, el valor del pseudo-costo de la restricción depende del juego entre el suministro del mes analizado y el 1er mes en el que se alcance el V_{min} , que es cuando se usa el almacenamiento adicional de Δ . En el periodo 3, el almacenamiento adicional se usa en el periodo 4; en el periodo 43, el almacenamiento adicional se usa en el periodo 48.

Ahora se analizará el signo y magnitud del pseudo-costo; por ejemplo:

- En el intervalo 3 fuerza a un desabastecimiento de los dos usos (en 0,5 y 1,5 respectivamente), y ese volumen es usado para mejorar los abastecimientos en iguales magnitudes en el intervalo 4, debido a que la fe es decreciente (Figura 5.84), o lo que es lo mismo, la no-linealidad de la función de beneficios.

Como el beneficio supera al perjuicio, el valor es positivo.

- En el intervalo 6 se fuerza a guardar agua a costa de desabastecer los usos, para permitir usarla en el intervalo siguiente, que ya estaba completamente abastecido, por lo que el balance es negativo, al igual que el pseudo-costo de aumentar la restricción en dicho intervalo.

Para este caso sencillo, si el suministro del mes en el que se aumenta V_{min} es mayor que el suministro en el que se emplea ese almacenamiento, el valor será positivo, y viceversa.

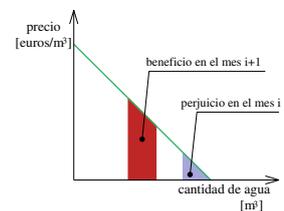


Figura 5.84: Ejemplo de aumento de beneficio neto.

5.7.11. Caso M1eva

Este caso es similar al Caso B2eva, salvo que en lugar de estudiar el pseudo-valor del recurso en el nudo 2 se estudia el efecto económico de **incrementar el volumen mínimo en la conducción C-3**. Se utilizó $\Delta = -0,2$.

En cada simulación modificada, se modifica sólo el caudal mínimo del mes bajo análisis, volviendo a adoptar el valor primigenio todos los meses siguientes.

Las Figuras 5.86 y 5.87 repiten los flujos del Caso B2eva en elementos que interesan para el análisis.

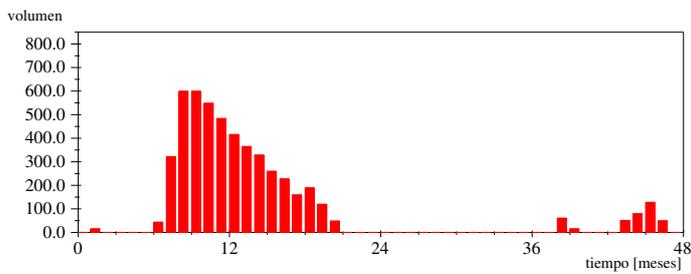


Figura 5.85: Volumen final almacenado en el embalse, Caso M1eva.

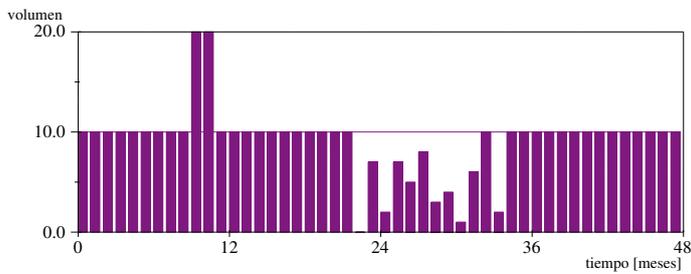


Figura 5.86: Flujo en C-3, Caso M1eva.

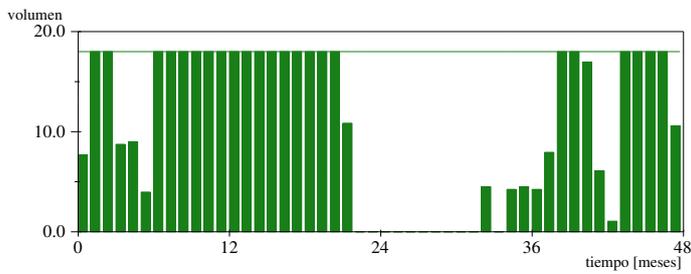


Figura 5.87: Suministro a Uso U, Caso M1eva.

La Figura 5.88 muestra los resultados económicos de este caso.

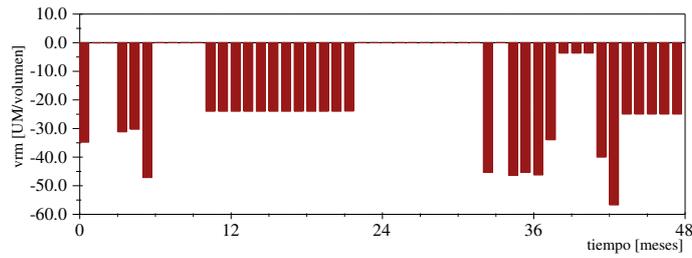


Figura 5.88: Pseudo-costo de la restricción de V_{min} en C-3, Caso M1eva.

Análisis

1. Los valores resultan negativos porque una reducción del caudal mínimo implica un aumento del beneficio económico, y viceversa.
2. Las modificaciones del V_{min} no tienen ningún efecto económico cuando no se puede cumplir esta restricción y el flujo por la conducción no está valorado, como sucede en los meses 23 a 33. Tampoco cuando los beneficios de reducir la restricción no pueden aprovecharse porque no se pueden almacenar, como en los meses 9 y 10 (embalse está lleno).
3. La uniformidad en los valores de los meses 11 a 23 y 43 a 48 se debe a la acción reguladora del embalse.
4. El valor del pseudo-costo de la restricción depende inversamente del suministro del mes (similar a lo que sucedía para otra variable en el análisis del Caso B0eva). Cuando actúa la regulación depende del mes en que se hace efectivo el uso o la quita del Δ aplicado a la restricción.

5.7.12. Caso M2eva

Este caso es similar al Caso M1eva, y se estudia el efecto económico de **incrementar el volumen mínimo en la conducción C-3**. Pero a diferencia de ese caso, ahora en las simulaciones modificadas se altera el caudal mínimo del mes bajo análisis **en todos los años del periodo simulado**, volviendo a adoptar el valor primigenio todos los meses siguientes.

Los flujos son los mismos que los del Caso M1eva (Figuras 5.86 y 5.87).

La Figura 5.89 muestra los resultados económicos de este caso.

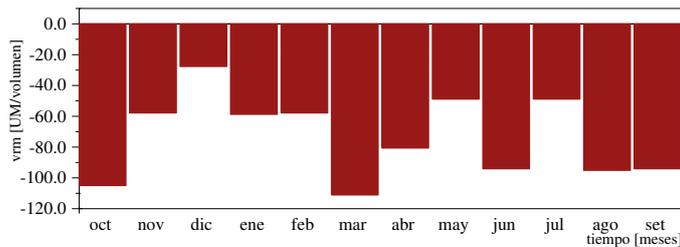


Figura 5.89: Pseudo-costo de la restricción de V_{min} en C-3, Caso M2eva.

Análisis

1. En este caso la Figura 5.89 presenta sólo 12 valores porque cuando se cambia el volumen mínimo de C-3, éste se aplica en dicho mes a todos los años.
2. La magnitud correspondiente a cada mes, por ejemplo enero, es igual a la suma de los periodos 1, 13, 25 y 37 del Caso M1 (comparar las Figuras 5.89 vs. 5.88). Este resultado no es generalizable, sino que ocurre en este sistema sencillo porque los efectos de la modificación se agotan en un par de meses. En este caso los valores promedios mensuales de la Figura 5.88 (Caso M1eva) tendrán una variación similar, por lo que ambos resultados ofrecen el mismo tipo de información y son igualmente útiles.
3. Esta clase de análisis tiene más sentido que el realizado en el Caso M1, puesto que las restricciones ambientales se establecen generalmente con una tabla de valores mensuales, y de esta forma permite detectar en qué meses este volumen mínimo tiene más repercusión económica.

5.7.13. Caso N1eva

Este caso es similar al Caso B2eva, solo que en vez de emplear las *fe* mensuales de la Figura 5.19 se usa una *fe* anual para el *Uso A* de ecuación $p_A = 50 - 0,0833 \cdot V_A$. Esta ecuación se obtiene expandiendo horizontalmente 12 veces la *fe* mensual del caso de referencia.

Lógicamente se repiten los flujos del Caso B2eva (Figuras 5.43 y 5.44). La Figura 5.90 muestra los resultados económicos de este caso, que son similares a los de la Figura 5.92.

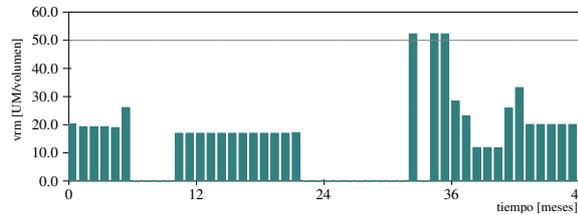


Figura 5.90: Pseudo-costo marginal en el nudo 2 con *fe* anual en *Uso A*, Caso N1eva.

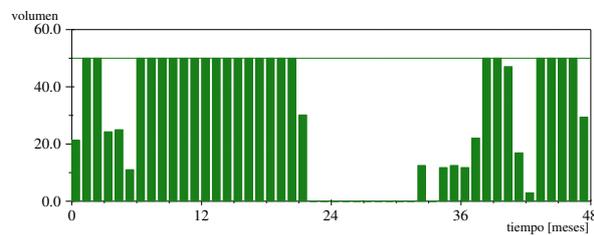


Figura 5.91: Suministro al *Uso A*, Caso N1eva.

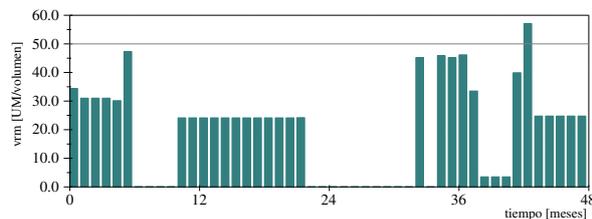


Figura 5.92: Pseudo-costo marginal en el nudo 2 con *fe* mensual en *Uso A*, CasoB2eva.

Análisis

1. Como la pendiente de la *fe* mensual es mayor que la pendiente de la *fe* anual, los valores del *pvmr* son menores en el caso anual cuando los déficit son chicos (primer y segundo año), y son mayores cuando los déficit son grandes (tercer año).
2. De todas formas, el patron de evolución temporal del pseudo-costo marginal resulta similar a cuando se utilizó una función económica mensual.

5.7.14. Caso P1eva

Este caso es igual al Caso C1eva, sólo que ahora se utilizan muchas series de aportaciones sintéticas, para hacer un experimento de Montecarlo.

Se usaron series cortas, de 5 meses; que por el proceso mediante el cual fueron generadas pueden asumirse como equiprobables. Para cada una de las 200 series, se ejecuta MEvalGes y se obtiene una serie temporal de valor del recurso (*pvmr*) en el nudo 2. Esto se repitió con 5 valores distintos de volumen inicial: $V_{ini} = 0$, $V_{ini} = 20$, $V_{ini} = 60$, $V_{ini} = 100$ y $V_{ini} = 140$. Luego, para cada uno de los 5 meses se ordenaron de forma creciente el *pvmr* y se calculó la probabilidad empírica ($p_e = nro.de\ orden / (N + 1)$) correspondiente a cada posición.

En la Figura 5.93 se representan los resultados de todos los meses para $V_{ini} = 0$.

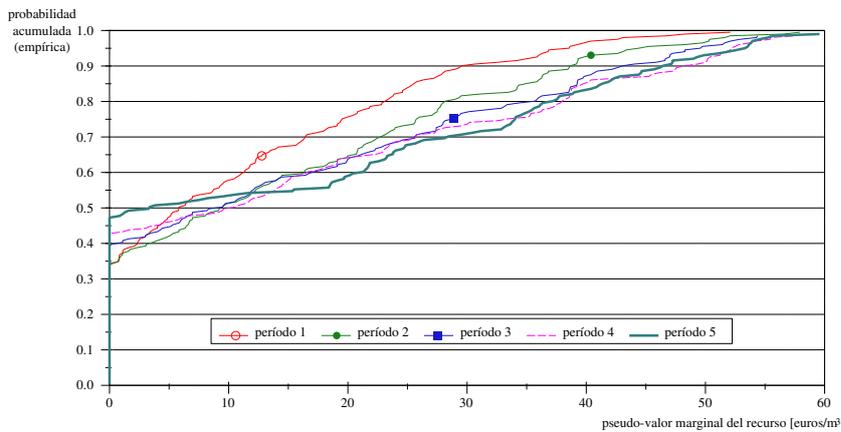


Figura 5.93: Probabilidad de *pvmr* en el nudo 2, con $V_{ini} = 0$, Caso P1eva.

Al comparar el último mes con el primero, puede observarse cómo para el período 5 aumenta la probabilidad de que *pvmr* = 0 y disminuye la probabilidad de tener valores elevados del *pvmr*. El efecto de la aleatoriedad de la aportación es en este caso máximo.

Sin embargo hay que mencionar que la generación de series sintéticas condicionadas al estado precedente (mes anterior al simulado), tienen un intervalo de confianza que se va ampliando en los sucesivos períodos o intervalos de tiempo, de forma que para todas las series sintéticas el valor del mes 4 es más incierto que el valor del mes 1, y con esto el intervalo de confianza de la curva del periodo 1 es más estrecho que el intervalo de confianza de la curva del periodo 4.

En la Figura 5.94 se representan también los resultados de los 5 meses para $V_{ini} = 100$. Por comparación con la Figura 5.93 puede verse que ahora el rango de variación es mucho más chico.

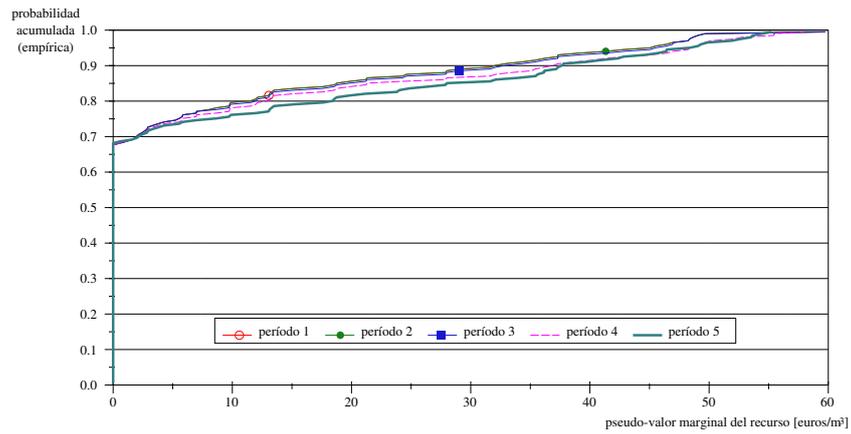


Figura 5.94: Probabilidad de pvmr en el nudo 2, con $V_{ini} = 100$, Caso P1eva.

De todas formas hay que recordar que los valores han sido ordenados de mayor a menor en cada mes individualmente; y entonces para una serie se pueden dar grandes variaciones entre el *pvmr* de un mes y el del mes siguiente. Un ejemplo extremo se tiene con la serie 30, con valores del *pvmr* de 5,23; 5,23; 5,23; 55,47 y 18,48.

En la Figura 5.95 se representan los resultados del 5to mes para todos los valores de volumen inicial del embalse antes mencionados.

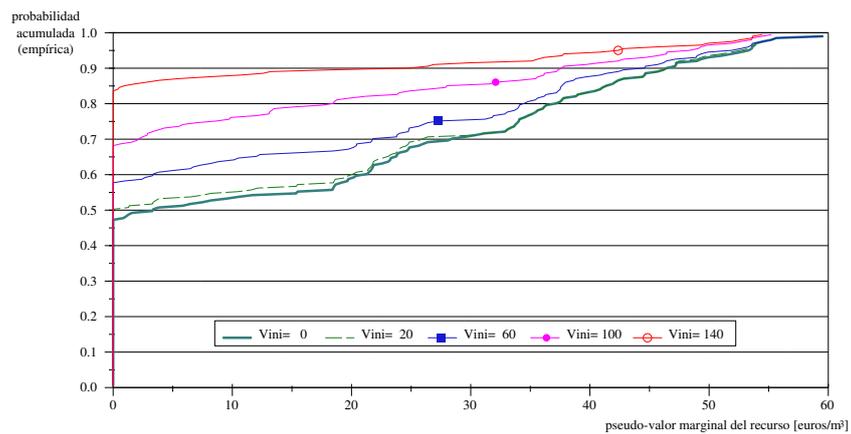


Figura 5.95: Probabilidad de pvmr en el nudo 2, para distinto V_{ini} , Caso P1eva.

La interpretación de este último gráfico es sencilla: al comenzar la simulación con un volumen almacenado mayor, aumentan las probabilidades de que el *pvmr* sea inferior a los valores anteriores. Evidentemente esa disminución de probabilidad está directamente

relacionada con el volumen inicial adoptado. Para $V_{ini} = 300$, en las 50 simulaciones el $pvmr$ resulta nulo en todos los meses.

Esto permitiría determinar el valor marginal del agua almacenada en un embalse en función de los perjuicios futuros evitados, de una forma probabilística. Calculando la sumatoria $S = \sum p_i \cdot pvmr_i$ para las distintas curvas de volumen inicial, se obtienen los resultados presentados en el Cuadro 5.1 (en este caso calculados con la curva correspondiente al 5to período).

V_{ini}	$\sum p_i \cdot pvmr_i$	valor marginal
0	16,40	0,108
20	14,23	0,089
60	10,69	0,075
100	7,70	0,098
140	3,77	

Cuadro 5.1: Pseudo-valor marginal del agua almacenada inicialmente en el embalse.

Capítulo 6: Caso de estudio I: Plan Hidrológico Nacional (España)

6.1. Introducción

La normativa española en materias de agua divide administrativamente el territorio en Confederaciones Hidrográficas, que corresponden en una primera aproximación con las grandes cuencas del país. Las Confederaciones deben elaborar cada 9 años [BOE, 1985] un Plan de Cuenca, con el objetivo de prever las situaciones futuras, ordenar el aprovechamiento del recurso y proponer actuaciones. Posteriormente el Estado debe elaborar un Plan Hidrológico Nacional (PHN) en el que se integren y se hagan homogéneos los planes anteriores, proponiendo actuaciones que afecten el territorio de varias Confederaciones.

En el año 2000 se elaboró el primer Plan Hidrológico Nacional [MMA, 2001]. Uno de sus contenidos principales es el trasvase desde la cuenca baja del río Ebro (a pocos kilómetros de la desembocadura) a las cuencas del litoral mediterráneo, desde Barcelona hasta Almería.

Este PHN se apoyaba en unos voluminosos estudios técnicos. A los efectos de este trabajo interesa particularmente el tomo 5 del PHN, donde se realiza el análisis económico de las transferencias de agua propuestas, con el fin de determinar si el trasvase bajo estudio producirá un beneficio económico positivo o negativo en el conjunto de la sociedad.

En este caso de estudio se ha aplicado una versión especialmente modificada del programa EcoGes, con el objeto de verificar los resultados presentados en el PHN, y de poder realizar un nuevo enfoque del estudio económico, modificando ciertas condiciones e hipótesis de partida, lo cual aporta más resultados para valorar el efecto económico del trasvase propuesto en el conjunto de la sociedad.

6.1.1. Descripción y planteamiento del problema original

El análisis económico del tomo 5 busca determinar solamente si los efectos económicos totales de las obras propuestas serán positivos o negativos. No se busca responder a otras cuestiones estrechamente vinculadas a ésta, como el reparto de costos¹(como se pagarán

las obras), ni quienes se benefician de ellas; ni la factibilidad financiera del proyecto, etc.

Haciendo un apretado resumen del tomo 5 del PHN (el cual conviene tener a la mano al leer este trabajo), la secuencia de tareas realizadas es la siguiente:

1. Determinar los costos de construcción y de operación de todos los elementos, en base a unas tablas de costos finales, estandarizados según un tamaño representativo de la obra en cuestión (túnel, balsa, presa, etc.), para distintos caudales.
2. Con esos costos optimizar la red de transferencias.
3. Con los flujos óptimos determinar el flujo de caja del proyecto.
4. Aplicar los criterios de VA, B/C y tir para determinar la conveniencia o no de realizar el proyecto.

Algunas de las condiciones importantes asumidas en el análisis son:

- El paso de tiempo a considerar es anual (se resuelve un único intervalo de tiempo).
- El plazo de amortización de la obra es de 50 años, y el valor residual al final de este periodo se asume nulo.
- La tasa de interés aplicada es del 4% anual (estipulada por la ley de Aguas).
- No se consideran costos ni beneficios indirectos.
- No se consideran los beneficios de la creación de empleo.
- Las cantidades a transferir se fijan inicialmente en base a las necesidades de las zonas receptoras.

El último punto es clave, porque debido a que los autores del PHN han *decidido previamente*² las cantidades de agua a suministrar a cada zona, las incógnitas del problema son: de qué fuente sacar el agua y mediante qué conducciones transportarlas para atender esas demandas con un costo mínimo.

Por ello, debido a que las cantidades a suministrar no son incógnitas del problema sino que están impuestas, este estudio no determinará el óptimo económico del sistema.

¹El reparto de costos en proyectos hidráulicos constituye toda un área de conocimiento, en la que ha sido muy empleada la teoría de juegos cooperativos. Para una comparación de los distintos métodos, puede consultarse entre otros textos a [Young et al., 1982, Young, 1985].

²Estas cantidades a suministrar a cada zona se determinan en base a los planes de cuenca de las zonas receptoras y a los estudios realizados en los tomos 2 y 3 del PHN, pero estas determinaciones no intervienen aspectos económicos.

6.1.2. Sistema de recursos hídricos

El esquema de las transferencias planteadas es el que se muestra la Figura 6.1.

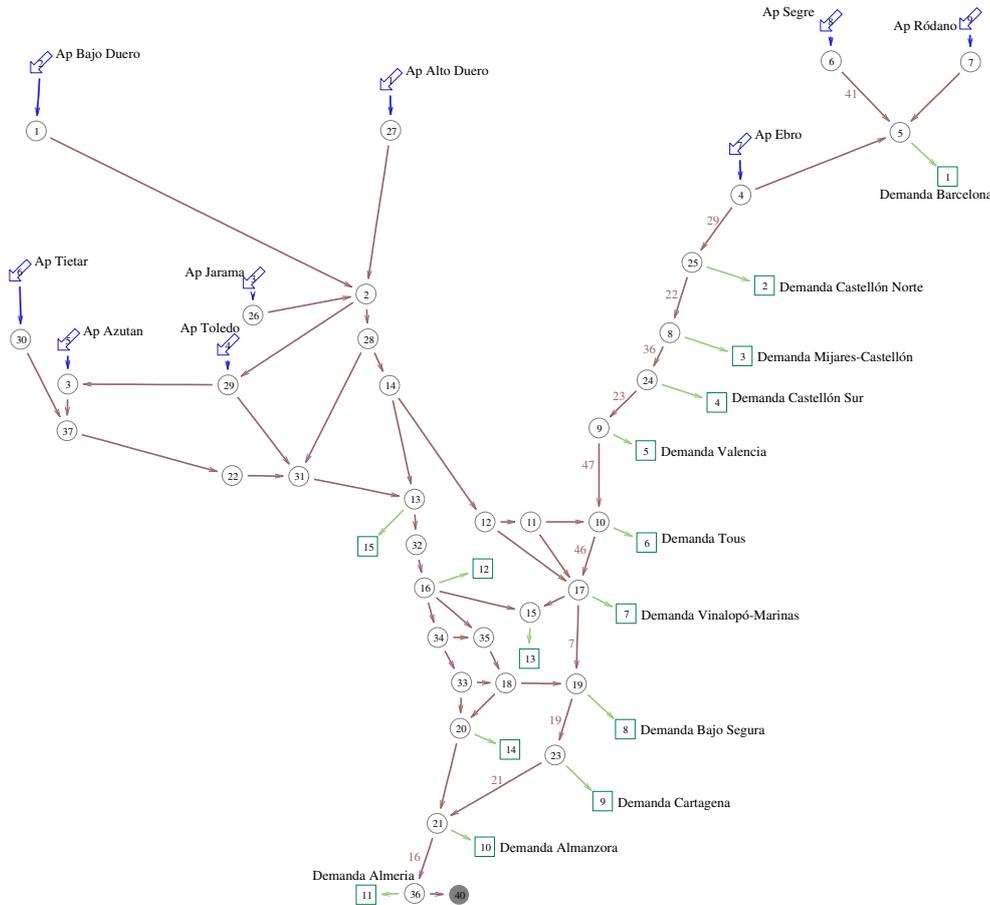


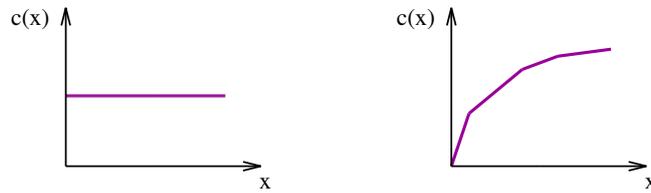
Figura 6.1: Esquema del PHN.

Las funciones de costos de los elementos del sistema están extraídas del mencionado PHN:

- aportaciones:
 - costos de detracción o tratamiento.
 - costos de compensación a la cuenca cedente.
- demandas:
 - costos de distribución.
 - de compensación a la cuenca cedente.
- conducciones:

- costos de amortización del costo de construcción.
- costos de energía para la circulación del agua.

La forma de las funciones de costo de los distintos elementos es la de las figuras siguientes:



La obtención de las funciones de costos total anual de las conducciones requirió un pre-proceso, para pasar del costo de construcción al costo anual de amortización, y agregar los costos de mantenimiento y operación. Esto se hizo para los distintos tamaños de conducción estudiados, y se presenta en el Anexo B.

6.2. Optimización de los flujos

Para resolver este caso hubo que realizar algunas adaptaciones al programa EcoGes:

- cambiar el paso de mensual a anual.
- crear un mecanismo iterativo *ad hoc* para determinar el costo de circulación en cada tramo (tema en el que se presentaron muchas dificultades).
- automatizar el preproceso de los datos, para pasar del costo de construcción al costo anual de amortización, operación y mantenimiento (A+O+M), como se explica en el Anexo B.

Como todos los años son iguales, se modela un único periodo (un año), y la red interna a optimizar es pequeña: 85 arcos y 51 nodos.

6.2.1. Problemas con las funciones de costo unitario

La principal complicación está en la función de costo por unidad de flujo para distintos valores de caudal. Las funciones de costos de las conducciones eran más complejas que las funciones de costos que nuestro programa podía procesar, y hubo que realizar adaptaciones.

EcoGes admitía inicialmente una única función de costo en cada elemento; mientras que las funciones de costo de las conducciones del PHN son parábolas, distintas por tramos, que unidas forman una función no siempre monótona.

En la Figura 6.2 se muestra a modo de ejemplo la función admitida por EcoGes y en la Figura 6.3 la función de la conducción 15. En cada tramo de la conducción 15 (separado por líneas verticales en la Figura 6.3) es válida una parábola.

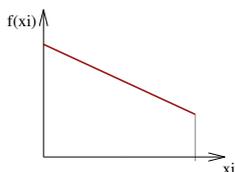


Figura 6.2: Costo admitido.

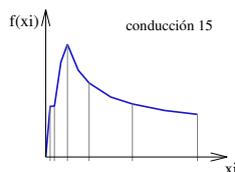


Figura 6.3: Costo real.

Se aprecia el aumento en la complejidad del problema a abordar, frente a lo que puede resolver el programa EcoGes en la versión standard.

Otra complicación adicional apareció con algunas funciones que no son monótonas: las funciones de las conducciones 2, 3, 13, 33, 38. Aunque en este punto estamos interesados en reproducir un problema matemático, en la práctica tiene poco sentido este empeño, porque funciones no monótonas no tienen sentido económico.

Ajustar una función continua a varios tramos

Para resolver el problema se usaron dos caminos distintos:

- a- Utilizar las 6 funciones parabólicas para cada conducción, e ir corrigiendo iterativamente los parámetros utilizados, según el tramo en que se encuentre el flujo actual. Así se obtienen exactamente los resultados del PHN, pero en ciertas condiciones se producen cambios cíclicos, sin que se detenga el procedimiento.
- b- Ajustar una función continua que reemplace a varios tramos de parábolas, y así reducir la cantidad de funciones de cada conducción. Se obtendrá entonces una solución aproximada a la del PHN, pero sin inestabilidades.

Para el segundo procedimiento, previamente hay que realizar el ajuste de las funciones (en Excel). Este procedimiento, aunque más laborioso es más robusto, ya que evita los cambios cíclicos que ocurren con el primer procedimiento.

6.2.2. Resultados

Los resultados óptimos obtenidos aquí son casi idénticos a los que figuran en el PHN:

- Los flujos en cada tramo, que eran las incógnitas del problema, son iguales.
- Los resultados económicos tienen algunas pequeñas diferencias, probablemente por problemas de redondeo. Por ejemplo, difieren muy levemente los costos de algunos elementos (en la columna *ctot* de la tabla 21, en la página 107 del tomo 5 del PHN), probablemente debido a efectos de redondeos. Esto hace que el costo anual

de A+O+M obtenido sea de 54922 *Mptas* en lugar de los 54854 *Mptas* que obtienen los autores del PHN (la diferencia es de 0.1%).³

Los flujos resultantes pueden verse en el Cuadro 6.1 y representados en la Figura 6.4, en la cual el grosor de la línea es proporcional al flujo):

nro. cond. (Fig. 6.1)	7	16	19	21	22	23	29	36	41	46	47	48
flujo [$hm^3/año$]	505	79	164	111	841	778	862	799	189	715	778	42

Cuadro 6.1: Solución del PHN.

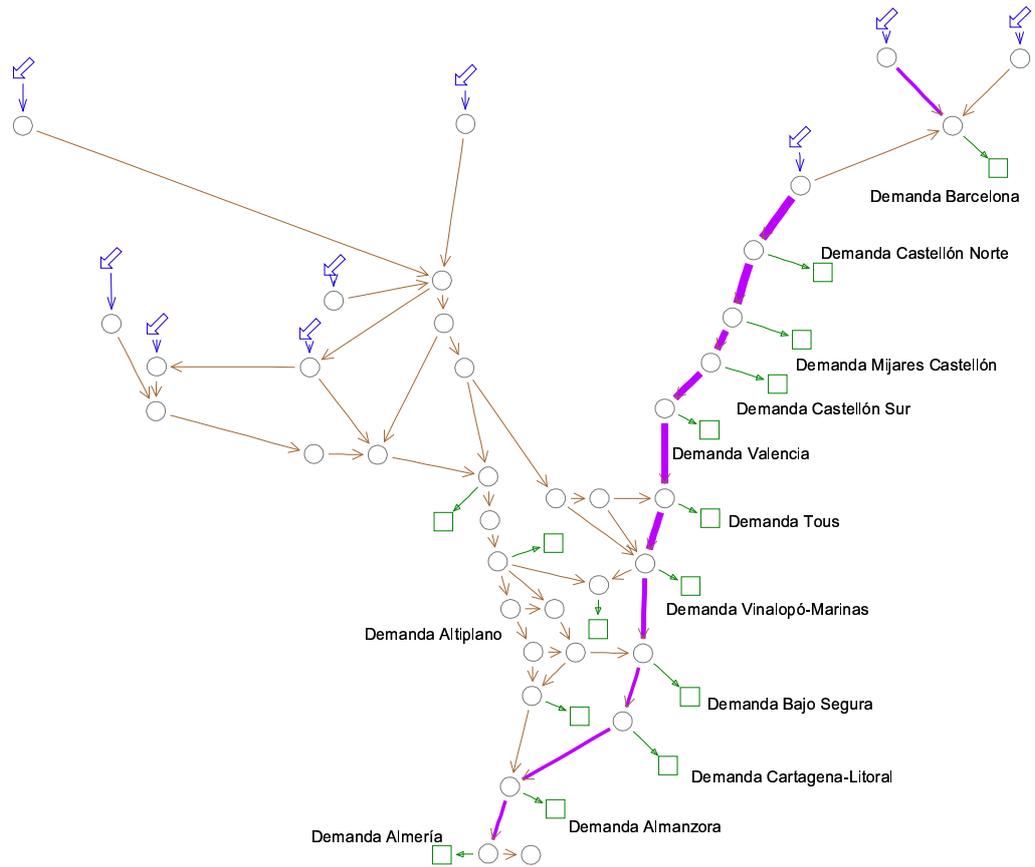


Figura 6.4: Solución del PHN.

³Se ha mantenido la unidad monetaria *pesetas* porque es la utilizada en el PHN. La conversión es 1€ = 166,386 *ptas.*

6.3. Breve análisis de resultados

A continuación presentamos la discusión de algunos de los principales defectos del análisis económico, que se resumen en:

1. El costo del agua para el uso agrario es inasumible, de no mediar subsidios.
2. Los beneficios están aumentados injustificadamente.
3. Los costos están reducidos.

Estas objeciones que aquí se presentan son coincidentes con las realizadas por otros investigadores [Hanemann, 2003, Arrojo Agudo, 2000, Arrojo Agudo, 2002].

6.3.1. Costo del agua en los puntos de consumo

Aunque no es objetivo del análisis económico del PHN determinar cómo se repartirían los costos, resulta interesante ver cuál es el costo del agua en cada punto de destinos, cosa que muestra el Cuadro 6.5.

Zona de utilización	precio [ptas/m ³]
Barcelona	35.6
Castellón Norte	20.4
Mijares-Castellón	27.5
Castellón Sur	31.0
Tous	38.0
Vinalopó-Marinas	57.2
Altiplano	88.2
Bajo Segura	55.6
Cartagena Litoral	59.6
Almanzora	81.6
Almería	93.4

Figura 6.5: Costos del agua trasvasada en los destinos.

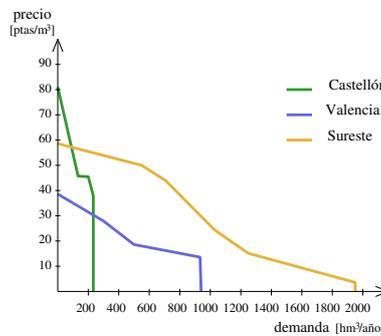


Figura 6.6: Curvas de demanda agraria (PHN).

Para las zonas que se abastecen del Ebro, se puede apreciar (como indica el sentido común), que a mayor alejamiento de la fuente, más se encarece el costo del suministro de agua.

El gráfico de la derecha reproduce unas curvas de demanda de agua tentativas para uso agrícola, en distintas zonas receptoras del agua (PHN, tomo 5, página 161).

Comparando los valores de la tabla y el gráfico, se observa que por encima de 60 ptas/m³ los volúmenes demandados son casi nulos. En Valencia, precios menores, como en Tous de 37 ptas/m³ provocan el mismo efecto.

Posteriormente (PHN, tomo 5, página 166), se establece que la capacidad de pago para los usos agrícolas es del orden de 20 o 25 ptas/m³, con lo cual a la luz de las

cifras anteriores está reconociendo que de no mediar subsidios, sólo los usuarios del N de Castellón podrían pagar lo que cuesta el agua.

No se quiere abrir un juicio de valor sobre la conveniencia social de subsidiar o no esta actividad (cómo se hace por cierto en otros ámbitos de la actividad pública como en infraestructuras, comunicaciones, etc). No se propugna por un neo-liberalismo inhumano, sin solidaridad entre regiones y ciudadanos. Sólo que todas estas cuestiones, como se dijo en la sección 2.3, pertenecen al campo de la economía normativa, y por ello fuera de la intención de este trabajo.

También el razonamiento anterior debe ser matizado por las siguientes cuestiones: normalmente cuando se reparten costos en una obra de este tipo, el “precio justo” para cada miembro de la coalición que participa del proyecto, se determina de tal forma que ningún miembro abandone la coalición, porque de esta forma todos se ven beneficiados por la declaración de interés público de la obra y otros beneficios de ser muchos. De esta forma se establecerían unos subsidios cruzados entre socios, de forma que el proyecto propuesto sea la mejor solución para todos que buscar una solución individual.

6.3.2. Beneficios magnificados

Con las cantidades de agua trasferidas para cada uso y los beneficios declarados, se puede comparar la tasa de beneficio de los 3 usos:

uso	volumen	beneficio unitario
abastecimiento	439 hm^3	135 $ptas/m^3$
garantía regadíos	222 hm^3	9 $ptas/m^3$
no sobreexplotación	339 hm^3	(años finales) 126 $ptas/m^3$

Cuadro 6.2: Beneficio unitario en los distintos usos, a partir de los resultados del PHN.

Se observan 2 cosas contradictorias:

- por un lado el bajísimo beneficio que se obtiene del agua destinada a aumentar la garantía en los regadíos existentes.
- por otro lado el abultadísimo beneficio que se obtiene de eliminar la sobreexplotación de acuíferos, casi tan alto como el de abastecimiento, lo que hace sospechar de una sobrevaloración de los beneficios por este concepto.

Ahora se verán distintos motivos por los que estos beneficios se reducen considerablemente con un análisis imparcial.

- a) **Elevado beneficio unitario del agua destinada al uso urbano**, que en el PHN menciona como 135 $ptas/m^3$. Este valor es exageradamente alto por los siguientes motivos:

- La fuente alternativa al trasvase no es la desalación de agua marina, sino el agua actualmente destinada a uso agrícola, a la que puede tener un valor seguramente menor de 30 *ptas/m³*. Si en lugar de hacer el trasvase se pagara este valor, seguramente habría multitud de usuarios con derechos deseosos de ceder ese agua [Arrojo Agudo, 2000].
- El bien que se debe evaluar es el agua cruda, sin contemplar los costos de tratamiento, distribución y saneamiento, porque estos seguirán presentes independientemente del origen del agua. Si tenemos en cuenta los datos de la tabla 33 de la página 145, la media actual de (captación + depuración) en las zonas receptoras es del orden de 60 *ptas/m³*, podría tomarse como la mitad de este valor el correspondiente a la captación.

Por lo antes expuesto, puede asumirse que, como mucho, el beneficio del agua destinada a uso urbano será de 35-40 *ptas/m³*. Pero generosamente se utilizará un valor de 50 *ptas/m³*.

- Incremento progresivo de los beneficios del uso urbano**, que en el PHN considera igual del primer año al último (página 139 del tomo 5), es también exagerado porque los 439 *hm³* destinados al uso urbano-industrial corresponden a un crecimiento gradual de esta demanda que se producirá en 20 años o un plazo similar, e irá creciendo poco a poco. Será más realista un crecimiento lineal que alcance el valor máximo en 20 años, por ejemplo. Además en el caso del abastecimiento de Barcelona, en que las necesidades de trasvase son esporádicas (tomo 3 del PHN), es aún menos realista el asumir el beneficio máximo todos los años.
- Elevado beneficio unitario del agua destinada a paliar la sobreexplotación de acuíferos** si antes establecimos que el beneficio del agua destinada al uso urbano es (generosamente) de 50 *ptas/m³*, no resulta lógico admitir que el uso menos palpable de evitar la sobreexplotación de los acuíferos tenga un beneficio unitario superior. Además, puesto que la sobreexplotación está provocada casi siempre por la extracción de agua para riego, debería valorarse con el beneficio unitario correspondiente a ese uso, puesto que si a dichos usos agrarios se les proporciona agua de otra fuente, la sobreexplotación se remedia. Por lo tanto es razonable asignar un beneficio a este uso de 20-35 *ptas/m³*.

6.3.3. Costos disminuidos

Ahora se enunciarán los principales motivos por los que el costo de las obras puede ser bastante mayor que el estimado en el PHN.

- El plazo de ejecución de la obra**, aunque se menciona la opción de considerar varios años para la ejecución de la obra, el análisis definitivo utiliza una ejecución en un año, y al segundo año ya empieza a obtener beneficios plenos. Sería bastante más lógico adoptar un plazo de ejecución de 3 o 4 años, y recién a partir de este tiempo se comenzarán a obtener los beneficios.

- b) **El precio de la energía**, que se considera más barata para los bombeos (costo), que en las turbinaciones (beneficios). Debe usarse el mismo precio, lo que incrementará los costos de operación.
- d) **Las desviaciones del presupuesto**, que siempre ocasionan un aumento del costo, y que son más importantes porcentualmente cuanto más singular son las obras, como es esta. Si bien los costos provienen de estandarizaciones estadísticas de precios finales (efectivamente pagados por las obras), es esperable siempre desviaciones al alza.

6.4. Nuevos cálculos

A los efectos de mostrar el provecho que se puede sacar al modelo presentado, vamos a estudiar distintas situaciones o plausibles. Estas situaciones las dividimos en 2 grupos:

- Modificar algunos de los parámetros económicos comentados en la sección anterior, pero manteniendo la filosofía del cálculo de que los volúmenes de agua a entregar están fijos *a priori*.
- Modificar la filosofía del cálculo e incorporar curvas tentativas de beneficios en cada uso, dejando que las cantidades a suministrar sean resultados de la ejecución del problema.

En ambos casos hay que asumir ciertos criterios y valores que se mencionarán explícitamente en cada caso.

6.4.1. Modificar algunos parámetros del problema

Primeramente se estudiará cómo cambian los resultados económicos del trasvase, al realizar algunas de las modificaciones de los parámetros de costos y beneficios comentados en la sección anterior.

Las modificaciones a realizar son las siguientes:

- a) Las dos modificaciones siguientes:
 - Reducir el beneficio del uso urbano del agua (de 135 a 50 *ptas/hm³*).
 - Aumentar el volumen del uso para abastecimiento en forma lineal, alcanzando el máximo en 20 años.
- b) Las dos modificaciones siguientes:
 - Considerar igual el costo de la energía consumida y la energía generada.
 - Repartir el costo de construcción en 3 años (en porcentajes del 30, 50 y 20 %); y no considerar beneficios los 2 primeros años de construcción.

- c) Suponer que por razones ambientales o de otra índole se trasvasa sólo el 80 % del volumen calculado.
- d) Reducir del beneficio unitario por disminuir la sobreexplotación de los acuíferos (de 126 a 38 *ptas/hm³*).

Las modificaciones se aplican sucesivamente, cada una sobre la anterior. Así, c) es a) + b) + c). Esto permitirá tener una idea de la importancia o “peso” en los resultados de cada modificación a realizar.

Resultados del PHN

Como se va a comparar los resultados económicos con los resultados del PHN, se presenta el flujo de caja del PHN a efectos comparativos (pág. 140, tomo 5, PHN) en la Figura 6.7.

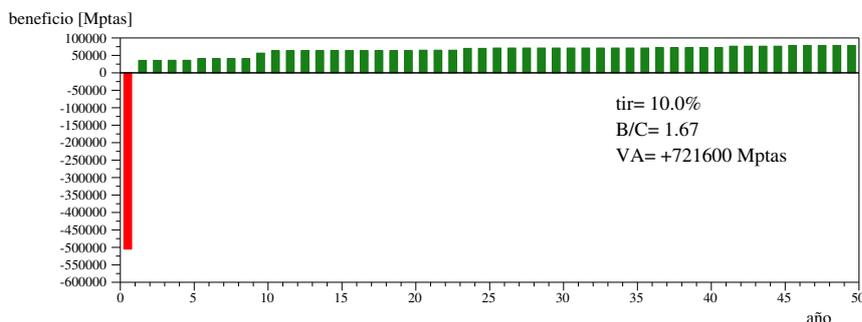


Figura 6.7: Flujo de caja del PHN.

Caso a)

Para este caso se redujo el beneficio unitario correspondiente al uso urbano.

Hubo que volver a ejecutar el modelo para distintos porcentajes crecientes de la demanda hasta alcanzar el máximo. Esto porque como los costos son no-lineales y hay costos fijos, no hay forma simple de conocer la proporción que disminuyen los costos al disminuir el volumen transferido.

Asumimos que en todos los años (incluidos los primeros 20 años, que son los de demanda urbana creciente), se amortizará la misma cantidad del costo de la obra.

También hubo que deducir las cantidades destinadas a cada uso en cada zona receptora. Estos datos tan elementales no figuran en el PHN (lo que daría pie a que el agua se destine a cualquier uso nuevos regadíos, por ejemplo). Así, los valores del Cuadro 6.3 están deducidos, con la única condición de que las sumas cuadren con los valores expresados en el PHN.

Demanda	Total	Tomo 3	Urbano	Agrícola	Sobreexpl.	Garantías
1 - Barcelona	189	180	180	0	0	0
2 - Castellón Norte	21	20	0	20	10	10
3 - Mijares-Castellón	42	40	20	20	10	10
4 - Castellón Sur	21	20	0	20	0	20
5 - Valencia	0	0	0	0	0	0
6 - Tous	63	60	10	50	0	50
7 - Vinalopó Marinas	168	160	129	31	12	19
8 - Bajo Segura	340	324	90	234	100	134
9 - Cartagena	53	50	10	40	20	20
10 - Almazora	32	30	0	30	15	15
11 - Almería	79	75	0	75	55	20
12 - Altiplano	42	40	0	40	0	40
SUMA	1050	1000	439	561	222	339

Cuadro 6.3: Reparto estimado del agua trasvasada.

De los dos cambios realizados, el que tiene mayor importancia es sin duda la disminución del beneficio unitario en el uso urbano. El nuevo flujo de caja se presenta en la Figura 6.8.

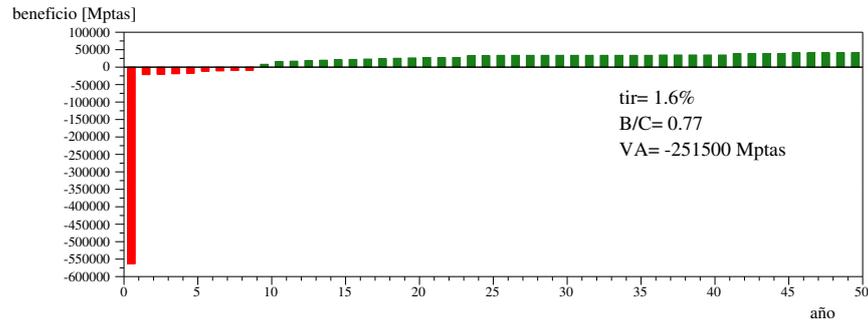


Figura 6.8: Flujo de caja para el caso a).

Caso b)

En este caso se agregó al caso anterior las hipótesis:

- los precios de la energía consumida y generada son iguales.
- la construcción se realiza en 3 años (en porcentajes del 30, 50 y 20%), y que en los 2 primeros años no hay beneficios.

Para la primera de estas dos hipótesis hubo que realizar nuevamente el cálculo del coeficiente de flujo de cada conducción. Los coeficientes que se aumentaron fueron los de las conducciones 3, 7, 8, 13, 18, 21, 30, 39 y 41. Los coeficientes que se disminuyeron fueron los de las conducciones 4, 6, 12, 17, 20, 25, 33, 37, 43, 44 y 45. Con estos nuevos valores se ejecutó nuevamente el modelo. Las diferencias en los resultados fueron pequeñas.

En este caso de la segunda hipótesis, no hubo necesidad de ejecutar el programa ya que las modificaciones afectan sólo al flujo de caja y se realizaron en Excel. El flujo de caja se ve en la Figura 6.9.

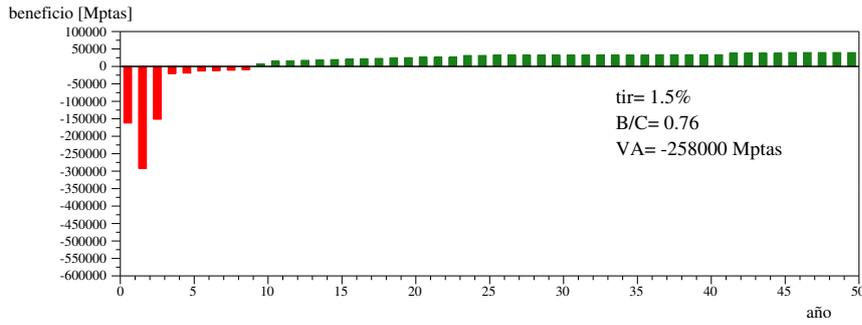


Figura 6.9: Flujo de caja para el caso b).

Caso c)

En este caso se supone que se trasvasa el 80 % del volumen de diseño. Al disponer del programa de optimización, se redujo el volumen a entregar a cada uno de los usos y se ejecutó nuevamente el programa. El flujo de caja resultante es el de la Figura 6.10.

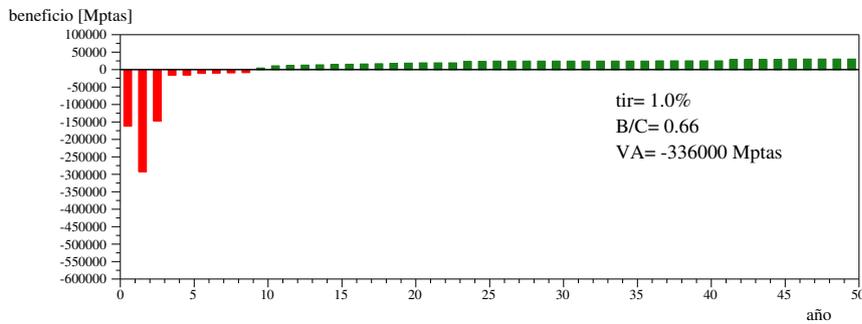


Figura 6.10: Flujo de caja para el caso c).

Caso d)

En este caso se reduce el beneficio unitario del agua destinada a evitar la sobreexplotación (de 129 a 35 ptas/hm³). El efecto de esta hipótesis es muy significativo, como se ve en la Figura 6.11.

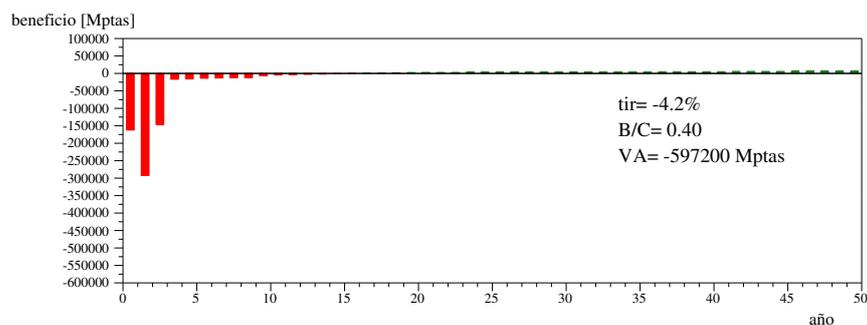


Figura 6.11: Flujo de caja para el caso d).

La tasa interna de retorno menor que cero, significa que quien hiciera el préstamo para la inversión debería además pagar intereses, lo cual viene a decir que es un negocio altamente deficitario.

Resumen

En el Cuadro 6.4 se pueden ver los indicadores de factibilidad económica para cada uno de los casos antes analizados.

caso	VA <i>Mptas</i>	beneficio/costo	tir
PHN	721.600	1.67	10.0 %
a)	-251.500	0.77	1.6 %
b)	-258.000	0.76	1.5 %
c)	-336.000	0.66	1.0 %
d)	-597.200	0.40	-4.2 %

Cuadro 6.4: Resumen de los distintos casos modificados del PHN.

De las cuestiones planteadas en la sección 6.3.3, sólo faltó analizar: el que las compensaciones son mayores de lo declarado y las posibles desviaciones del presupuesto. Estos dos efectos son más complicados de evaluar, pero aún sin incluirlos se aprecia que el proyecto es fuertemente deficitario en el aspecto económico.

Las modificaciones que tienen mayor efecto son las de disminución del beneficio unitario en los usos urbano y la disminución en el beneficio de evitar la sobreexplotación de acuíferos.

6.4.2. Usar curvas de demandas para los usos urbano y agrícola

Esta modificación es más interesante: se le asigna a cada uso una función económica de los beneficios (de acuerdo al agua recibida), y ya no se impone el volumen a suministrar fijo de antemano, sino que el programa lo determina al minimizar el costo de los perjuicios.

Las curvas de demanda usadas no provienen de estudios detallados, sino de estimaciones realizadas en el PHN o deducciones realizadas a partir de datos del Libro Blanco del Agua [LBA, 2000].

Obtención de la curva de demanda para uso urbano

1. Se parte de la figura 37 de la página 150 ([MMA, 2001], tomo 5) de abastecimientos domésticos. Considerando la nube de puntos que está por encima de la función ajustada. Elegimos una envolvente a esta nube que deje a casi todos los puntos por abajo. Esta envolvente pasa por los puntos (85; 160) y (260; 0), y su ecuación es $y = 60 - 0.229x$.
2. Como la curva anterior es de agua tratada y distribuida, debemos restarle el costo del tratamiento y la distribución. De tabla de la página 145 se extrae la distribución porcentual media de los costos de captación, depuración, distribución y saneamiento medios del agua en todas las comunidades autónomas. Considerando las comunidades receptoras (Valencia y Murcia) el costo de captación + depuración representa un 20 % del costo total. Aunque deberíamos considerar sólo el costo de captación, dejamos el costo de depuración para quedar del lado de la seguridad. La curva de demanda pasa ahora por (85; 32) y su ecuación es: $y = 47.5 - 0.183x$.
3. Las transferencias destinadas a abastecimiento son de 439 hm^3 . De las páginas 371-374 de [LBA, 2000], se extraen las proyecciones de población, volumen demandado y dotaciones que se reproducen en el Cuadro 6.5.

Com. Autónoma	uso	año	volumen [$\text{hm}^3/\text{año}$]	dotación [$\text{l}/(\text{dia} \cdot \text{hab})$]	población [miles de hab]
Valencia	urbano	2005	613	402	4178
Valencia	urbano	2015	686	449	4186
Valencia	industrial	2005	92		
Valencia	industrial	2015	116		
Murcia	urbano	2005	180	337	1450
Murcia	urbano	2015	184	332	1500
Murcia	industrial	2005	38		
Murcia	industrial	2015	38		

Cuadro 6.5: Proyecciones de demandas por usos, LBA.

Asumiendo una dotación total de $390 \text{ l}/(\text{dia} \cdot \text{hab})$ como media de las zonas receptoras, el agua trasvasada alcanzaría para abastecer a 3,08 millones de habitantes.

4. Multiplicando el eje de cantidades por esta cantidad de habitantes y convirtiendo las unidades a [$\text{hm}^3/\text{año}$], obtenemos una aproximación a la curva de demanda urbana.

Obtención de la curva de demanda para uso agrícola

Las curvas de demanda originales para uso agrario del PHN (Figura 6.6) deben corresponder a pie de parcela, por lo que también hay que descontar de las mismas el costo de distribución. Asumimos que el costo de distribución es del 70%, por lo que el efecto es de re-escalar las 3 curvas desplazándolas hacia abajo.

Curvas de demanda a utilizar

Recapitulando, las curvas de demanda adoptadas para los usos se ven en la Figura 6.12.

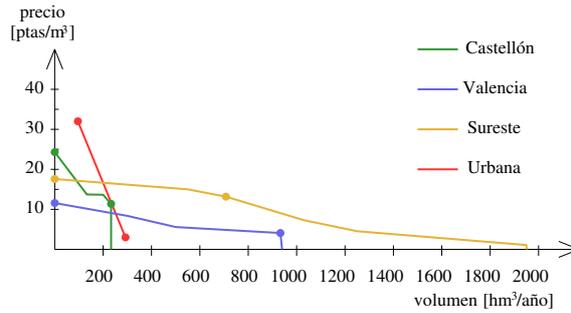


Figura 6.12: Curvas de demanda utilizadas.

A su vez las curvas de demandas del gráfico anterior se han simplificado un poco más transformándolas en rectas, que pasan por los dos puntos de cada una de las respectivas curvas. Los parámetros de las ecuaciones de las rectas de la Figura 6.12 se presentan en el Cuadro 6.6.

Región	a	b
Castellón	-0.05549	24.30
Valencia	-0.00805	11.59
Sureste	-0.00623	17.58
Urbana	-0.14708	17.87

Cuadro 6.6: Parámetros de las curvas de demanda utilizadas.

Nuevo esquema

Para realizar este cálculo, las demandas del esquema original se desdoblaron en usos urbanos y agrícolas, como muestra la Figura 6.13.

A cada demanda agrícola se le asigna la curva de demanda correspondiente a la zona en que se ubica, mientras que todas las demandas urbanas tienen la misma curva de demanda (en color rojo).

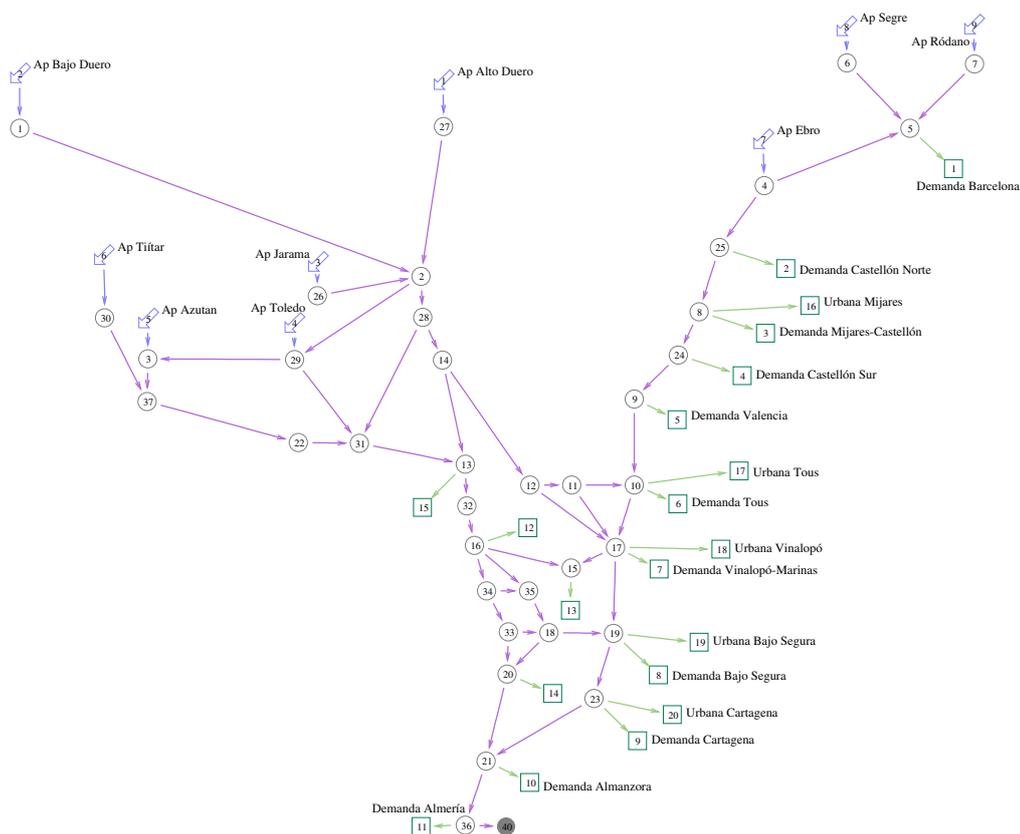


Figura 6.13: Nuevo esquema del PHN.

Resultados

La ejecución del programa arrojó los resultados del Cuadro 6.7.

nro. conducción (Fig. 6.1)	22	29	41
flujo [$hm^3/año$]	10	10	43

Cuadro 6.7: Solución utilizando curvas de demanda.

Con un resultado positivo del proyecto (beneficios) de 293 $Mptas$, y abasteciendo únicamente las demandas urbanas de Barcelona y Mijares con 43 y 10 $hm^3/año$ respectivamente.

Otra prueba que se hizo fue incrementar las curvas de beneficio de todos los usos un mismo porcentaje, hasta conseguir un volumen similar a trasvasar que en el PHN. Las curvas de beneficio unitario hubo que incrementarlas un 65% (manteniendo la pendiente, o sea la parte no lineal del beneficio) para conseguir un volumen trasvasado de 954

$hm^3/año$, que atiende a las siguientes demandas: urbanas de Barcelona, Mijares y Tous; y agrícolas de Castellón Norte, Mijares y Castellón Sur.

Con esta última prueba se confirma lo que se mencionó anteriormente: las demandas agrícolas, en especial las que están más alejadas del río Ebro, no pueden asumir los costos del agua trasvasada, a menos que sean subsidiadas.

Capítulo 7: Caso de estudio II: cuena del Júcar

La cuena del río Júcar está ubicada en el este de España, y descarga sus aguas en el mar Mediterráneo (Figura 7.1).

La cuena del Júcar, junto con las cuenas del Turia, Mijares, Palancia, Serpis, Vinalopó y otras menores, constituye el ámbito administrativo de la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ). La cuena del río Júcar, con 22400 km^2 de extensión es la más grande y la que dispone también de los mayores recursos hídricos (Figura 7.2).



Figura 7.1: Ubicación del río Júcar, y territorio de la CHJ.

Los principales tributarios del río Júcar son el río Cabriel y el río Magro.

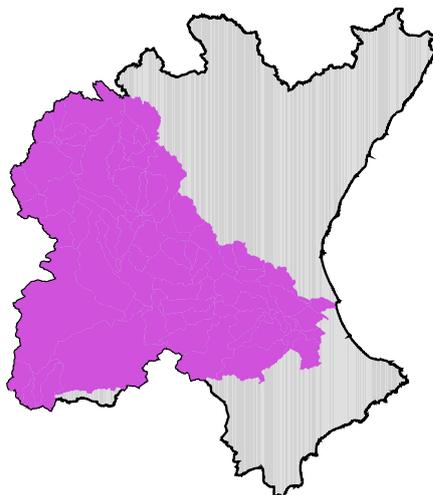


Figura 7.2: Cuena del Júcar dentro del ámbito de la CHJ.

7.1. Descripción de la cuenca

7.1.1. Geografía

Dentro de la cuenca hidrográfica se diferencian claramente dos zonas [Estrela, 2003]:

- Interior: montañoso, con altitudes superiores a los 1.500 m. Los relieves interiores son fundamentalmente calizos.
- Llanuras litorales o “planas”, que quedan truncadas por prolongaciones de los relieves interiores. Destaca sobre manera la formación de albuferas como la de Valencia.

De todo el territorio de la CHJ, un 25 % de la superficie total de la cuenca está en cotas superiores a 1000 metros, un 33 % corresponde a las planas litorales, y el restante 42 % corresponde a las mesetas de la llanura manchega (Figura 7.3).

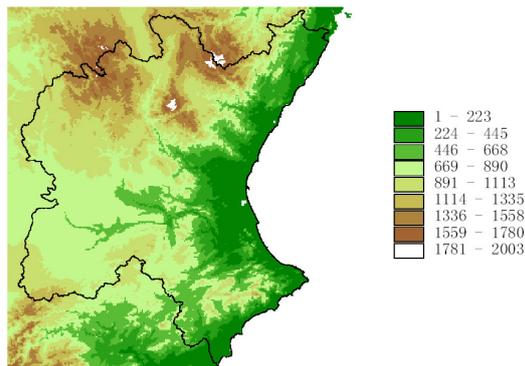


Figura 7.3: Modelo digital del terreno de la CHJ.

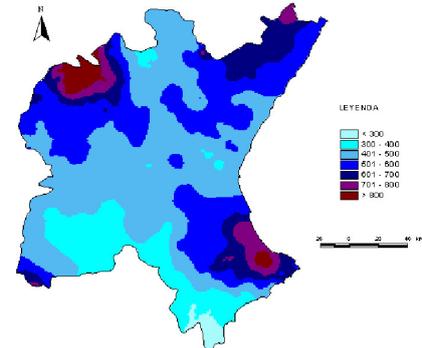


Figura 7.4: Precipitación media anual en la CHJ.

7.1.2. Climatología

La precipitación media anual de la cuenca es de 510 mm, siendo la temperatura media de 13,6 °C.

El clima está caracterizado por un intenso y largo verano. Aunque con marcadas diferencias entre este y oeste.

En las zonas costeras, las precipitaciones se caracterizan por la llamada “gota fría”, que provoca inundaciones catastróficas. Éste es un fenómeno convectivo a gran escala, donde una situación de viento del este los alimenta de aire húmedo proveniente del mar Mediterráneo.

La distribución de precipitaciones también está influenciada por el relieve, como se ve en la Figura 7.4. En otoño se recoge casi la mitad de la precipitación anual, en primavera hay un segundo máximo (y máximo absoluto en el interior), y en verano es casi inexistente excepto tormentas convectivas antes mencionadas.

7.1.3. Cubierta vegetal e infiltración

El entorno de la cuenca puede definirse de manera global como una zona semiárida. La humedad del suelo es pobre y más teniendo en cuenta que la precipitación es de tipo convectivo.

La erosión y degradación del suelo es un problema presente, causado fundamentalmente por la deforestación, bien por la ocupación agrícola y ganadera o por los incendios de los últimos años. Los suelos sin vegetación expuestos a la precipitación generan, una vez se han secado, una capa duro o costra, que produce una disminución de la infiltración y en consecuencia de la humedad reticular del suelo.

La presencia masiva de calizas provoca una de la características fundamentales de la cuenca: la enorme permeabilidad y capacidad de infiltración que poseen sus materiales. Por debajo de 50 mm de precipitación media diaria en la cuenca del Júcar, no se produce escorrentía, siendo ésta del 15% si se eleva la precipitación a 200 mm. Por ello en la cuenca no existen crecidas medias, sólo pequeñas o de tipo catastrófico.

7.1.4. Recursos hídricos

Los ríos de la cuenca tienen un régimen marcadamente mediterráneo, caracterizado con unas fuertes sequías en verano y crecidas en otoño. El río Júcar nace en los Montes Universales y recorre 500 km antes de desembocar a la vera de la ciudad de Cullera. Tiene una aportación media de 1.825 hm³/año. El principal afluente es el río Cabriel, y con menos importancia el Albaida y el Magro.

En cuanto a los recursos subterráneos, las fuertes extracciones que se realizan en Albacete, en el acuífero de la Mancha Oriental, afectan notablemente a los drenajes desde este acuífero al río Júcar, disminuyendo los caudales del mismo.

Los recursos hídricos existentes en la cuenca se presentan en el Cuadro 7.1.

Escorrentía superficial	Aportes subterráneos	Bombeos netos	Total
602 hm ³	1.480 hm ³	302 hm ³	2.384 hm ³
25,2 %	62,1 %	12,7 %	100 %

Cuadro 7.1: Origen de los recursos de la cuenca del Júcar [C.H.J., 1997].

Esta cuenca ha sido objeto de numerosos estudios hidrológicos y de recursos hídricos, actualizados periódicamente [DIHMA, 1997, C.H.J., 2000, C.H.J., 2001].

Los dos principales acuíferos de la cuenca se describen a continuación.

Acuífero Mancha Oriental

La unidad hidrogeológica 8.29 Mancha Oriental se sitúa en el extremo oriental de la llanura manchega, con una extensión de unos 7500 km² (Figura 7.5).

Esta unidad hidrogeológica se puede considerar como un acuífero multicapa [IGME, 1980], formado por la superposición de tres unidades acuíferas:

- la capa más superficial corresponde a un acuífero libre, que se desarrolla sobre calizas lacustres, con unos 150 m de potencia máxima, y valores de transmisividad de m²/h.
- un acuífero confinado con litología de dolomías y calizas, a veces karstificadas. Su potencia oscila entre los 50 y los 150 m, y transmisividades medias de 800 a 380 m²/h.
- un acuífero profundo, confinado en su mayor parte, y constituido por dolomías y calizas frecuentemente karstificadas. Su potencia media es de 250 a 350 m (máxima de 400 m) y las transmisividades medias de 100 a 500 m²/h.

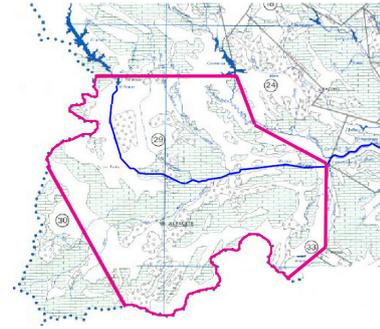


Figura 7.5: Área del acuífero Mancha Oriental y río Júcar.

Acuífero de la Plana Sur de Valencia

Este acuífero multicapa tiene una superficie aflorante de 500 km². La capa superior está compuesta por gravas, arenas, arcillas y limos intercalados en una formación limo-arcillosa; mientras que la capa inferior está constituida por areniscas, y materiales calcáreos.

Recibe recargas de las infiltraciones por las precipitaciones, por los excesos de riegos y transferencias desde otras formaciones geológicas. Las salidas son los drenajes al río Júcar, las salidas al mar, y las extracciones para usos urbanos, agrícolas e industriales. Otra salida natural es a la Albufera de Valencia, que es un parque natural. Presenta zonas con problemas de intrusión de agua marina y elevado contenido de nitratos.

7.1.5. Usos actuales

Los recursos disponibles se destinan al abastecimiento de la población, al uso industrial y a riegos agrícolas. Es en este último donde se encuentra el mayor consumo de agua, como se aprecia en el Cuadro 7.2.

uso	Urbano	Agrícola	Industrial	Total
volumen [hm ³ /año]	103	1.039	48	1.190
porcentaje	8,7	87,3	4,0	100

Cuadro 7.2: Volumen de usos consuntivos del agua en la cuenca del Júcar [C.H.J., 1997].

7.1.6. Actividades económicas

Las actividades económicas tanto en la cuenca como en todo el ámbito de la CHJ giran en torno a dos rasgos esenciales:

- Un sector agrario que ocupa en la CHJ una superficie total de 1.800.000 *ha*, de las cuales cerca de 350.000 *ha* están dedicadas a los cultivos de regadío y situadas en la fachada litoral y meseta manchega. De forma que una gran proporción de estos regadíos se encuentran abastecidos por aguas del río Júcar. De ahí que la evolución en el tiempo de la superficie bajo riego en la CHJ que se presenta en la Figura 7.6 resulta también indicativo de lo que ha sucedido en la cuenca del río Júcar.

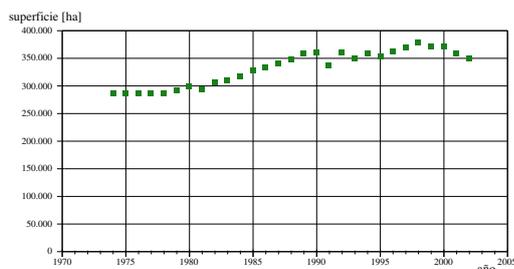


Figura 7.6: Evolución de la superficie regada en el ámbito de la CHJ.

- Una fuerte interacción entre el sector industrial (bienes de consumo final y alimentos) y el de servicios, propiciada por las actividades turísticas.

El sector agrario ha sufrido en las últimas décadas importantes procesos de transformación. La mecanización, y luego la introducción de nuevas tecnologías en el campo, así como un cambio de tipos de cultivos, permitió desarrollar nuevas áreas de regadío en zonas tradicionalmente de secano. También se ha producido un desarrollo notable en zonas tradicionalmente deprimidas mediante los planes de desarrollo de la agricultura de montaña, merced a las ayudas recibidas de la Unión Europea mediante la Política Agraria Comunitaria (PAC).

En los últimos años se ha acentuado más el modelo económico dual antes mencionado, tanto en la especialización de las líneas de actividad económica como en la configuración espacial de las mismas. Y se ha producido un notable incremento de los procesos de urbanización debido al éxodo de la mano de obra hacia los polos de industrialización.

El sector industrial, por tratarse de un sector muy ligado a la producción de bienes de consumo y con una fuerte componente exterior, resulta muy sensible a las evoluciones de la coyuntura económica.

El turismo es uno de los sectores de mayor peso específico en el ámbito territorial de la Confederación Hidrográfica del Júcar; el turismo de playa tiene como característica principal la estacionalidad de los requerimientos hídricos para abastecimiento.

7.1.7. Principales infraestructuras

Embalses

Los embalses más importantes de la cuenca son los que se muestran en el Cuadro 7.3.

embalse	río	destino
Alarcón	Júcar	abastecimiento, riego, hidroelectricidad
Contreras	Cabriel	abastecimiento, riego, hidroelectricidad
Tous	Júcar	laminación avenidas
El Molinar	Júcar	hidroeléctrico
El Naranjero	Júcar	hidroeléctrico
Cortes II	Júcar	hidroeléctrico
La Muela	depósito superior	hidroeléctrico

Cuadro 7.3: Principales embalses en la cuenca del Júcar y finalidad [C.H.J., 1997].

Aparte de éstos, hay otros de menor importancia, es con fines de riego o mini aprovechamientos hidroeléctricos, o de laminación de avenidas en cuencas pequeñas.

Canales

Los principales canales del sistema Júcar son los que se muestran en el Cuadro 7.4.

canal	toma	longitud	capacidad
Canal Júcar-Turia	presa de Tous	60 km	32 m ³ /s
Acequia Real del Júcar	azud de Antella	54 km	34 m ³ /s
Acueducto Tajo-Segura	presa de Alarcón	km	m ³ /s

Cuadro 7.4: Principales canales en la cuenca del Júcar y sus características [C.H.J., 1997].

Aparte de estos canales principales, hay una vasta red de canales secundarios, acequias y redes de drenaje para realizar la distribución del agua para riego.

7.2. Ubicación geográfica de los distintos usos

En la página siguiente la Figura 7.7 muestra el esquema del sistema de explotación del Júcar, con la ubicación geográfica de los elementos incluidos en el modelo de la cuenca. Este esquema, está tomado de [MS, 2002], ha sido realizado para la CHJ y está adecuadamente validado; por lo que se ha utilizado como punto de partida en este trabajo.

Los usos se representan con un cuadrado: los urbanos son de color naranja, el industrial de color negro y los usos agrícolas en color verde. El río Júcar y su tributario Cabriel se representan en línea gruesa. Los elementos en gris claro son posibles ampliaciones futuras, actualmente no operativas.

7.2.1. Descripción del modelo

El sistema del Júcar (Figura 7.7) está representado por el río Júcar y su principal afluente el Cabriel. Hay tres grandes embalses reguladores: Alarcón, Contreras y con menos capacidad el de Tous.

La característica más destacable es que la mayor concentración de usos se ubica en la zona costera, la llamada Ribera del Júcar, aguas abajo del embalse de Tous.

Los usos agrícolas están formados por los Riegos Tradicionales del Júcar (riegos de la Ribera Alta y riegos de la Ribera Baja), por los riegos del canal Júcar Turia y por los nuevos regadíos de la Mancha.

Las poblaciones que se abastecen en su totalidad o en parte del sistema del Júcar son: Valencia, Albacete y Sagunto.

El único uso industrial es el consumo para refrigeración de la central nuclear de Cofrentes.

Río Júcar hasta el embalse de Molinar

La aportación restituída a régimen natural *APO1. Alarcón* (flecha de color celeste), representa la cuenca del río Júcar desde el nacimiento del río hasta este punto, ya que puede considerarse que no presenta alteraciones significativas respecto a la condición natural. Del nudo 34 hay una toma para un potencial uso agrícola *Reg. Cabecera del Júcar*, que aún no se halla implementado.

Aguas abajo está el embalse de Alarcón —el de mayor capacidad en la cuenca— del que salen las tomas a los usos de la ciudad de Albacete, el trasvase a la Marina Baja (Mancomunidad del Taibilla) y el suministro para riegos de La Mancha con la finalidad de reducir la magnitud de los bombeos actuales en el acuífero.

A continuación se representa el río Júcar con dos conducciones de tipo 1. En el nudo 4 se incorpora la aportación (restituída a régimen natural) *APO2. AlarcónMolinar*, correspondiente a la intercuenca entre los embalses de Alarcón y Molinar.

Entre los nudos 4 y 5 el río Júcar se representa con una conducción de tipo 3: *Conexión Júcar - Mancha*, que conecta el río Júcar con el acuífero de la Mancha Oriental. Este acuífero se ha modelado como un acuífero pluricelular englobado con dos celdas. Las extracciones de este acuífero para uso agrario se representan mediante el uso *Bombeos Ac.Mancha*. La toma de agua superficial de este uso sólo existe porque es necesaria para el funcionamiento del programa, pero se le ha impuesto la condición de volumen máximo nulo, de forma que se mantiene la condición de abastecimiento sólo desde el acuífero subyacente.

Luego siguen varios tramos de conducciones simples hasta el nudo 19, que representa el embalse de Molinar, de muy escasa capacidad de almacenamiento. Esta característica

hace que se represente como un nudo, más un uso (14) para representar la evaporación del embalse.

Río Cabriel hasta la confluencia con el Júcar

Para la subcuenca del río Cabriel, aportación *APO3*. *Contreras* representa la contribución de la cuenca superior, no alterada sustancialmente. También aquí se representa un uso agrícola potencial (aún no implantado) antes del embalse.

El embalse de Contreras tiene filtraciones que van a parar al acuífero 1 o *ACU-Filt. Contre-ras*, representado con un modelo unicelular. De éste embalse parte una conducción de tipo 1 *Cabriel-1*, que luego se enlaza con una conducción de tipo 3 denominada *Cabriel2* la cual recoge las filtraciones del embalse de Contreras. Dichas filtraciones se incorporan con un desfase temporal respecto al período de tiempo en el que se producen.

Río Júcar entre Molinar y Tous

Desde el embalse de Molinar (representado por el nudo 19 y el uso adyacente) sale una conducción del tipo 1 que representa el tramo del río Júcar desde el citado embalse hasta la confluencia con el río Cabriel. La confluencia de los dos ríos está representada por el nudo 6. En éste se inicia una conducción del tipo 1 que finaliza en un azud (nudo 8), que representa el antiguo embalse de Embarcaderos actualmente inundado por el embalse de Cortes II. En este punto está la toma del uso para refrigeración de la central nuclear de Cofrentes. Esta toma tiene asociado un elemento de retorno superficial porque una parte del agua derivada para la central se devuelve al río. Aquí se considera también una aportación de la intercuenca denominada *Contreras-Molinar-Tous*.

Desde allí continúa el río hasta el embalse de Cortes, del que sale una toma a un uso ficticia que representa las evaporaciones del depósito de La Muela. Este depósito es un embalse artificial (superior) de una central reversible (turbinación-bombeo). También sale una conducción que representa al trasvase Júcar-Vinalopó, actualmente en construcción.

Continuando hacia aguas abajo está el embalse de El Naranjero, del que parte una conducción de tipo 3 que representa el tramo del río Júcar hasta el embalse de Tous, y que recoge el 40 % de la aportación *Contreras-Molinar-Tous*. Para desglosar la aportación anterior se usa una conducción ficticia de tipo 2 entre los nudos 16 y 17, cuyas filtraciones van a un acuífero unicelular que tiene un coeficiente de descarga unitario, de forma que las salidas son iguales a las entradas sin desfase temporal. Estas salidas del acuífero las recoge la conducción de tipo 3 que conecta los embalses de Naranjero y Tous.

Río Júcar aguas abajo de embalse de Tous

La mayor parte de los usos del sistema se encuentran aguas abajo del embalse de Tous, siendo la zona más compleja del modelo, tal como se aprecia en la Figura 7.8

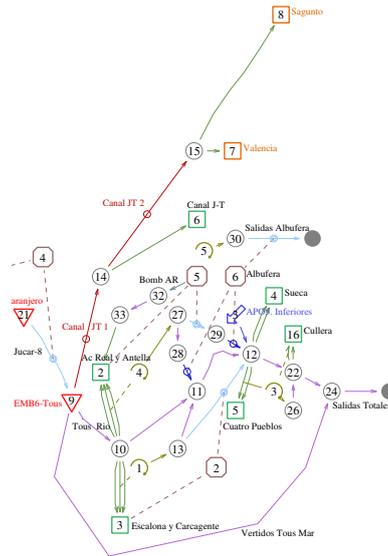


Figura 7.8: Detalle del esquema del SRH del Júcar aguas abajo de Tous.

El canal Júcar-Turia parte del embalse de Tous, y se ha representado mediante dos conducciones del tipo 2 denominadas *C.J.T.-1* y *C.J.T.-2*; que tienen filtraciones que suponen un volumen de agua que se pierde para el sistema. La primera conducción que representa el canal Júcar-Turia finaliza en el nudo 14, del que se realiza la toma para el uso agrícola *Riegos Canal J-T*.

El tramo *C.J.T.-2* finaliza en el nudo 15 del que salen las tomas para los usos urbanos de *Sagunto* y *Valencia*.

Del embalse de Tous salen también otras dos conducciones tipo 1: la que termina en el nudo 10 representa las salidas para usos en la parte inferior de la cuenca; y la que finaliza en el nudo 24 representa los vertidos de Tous al mar.

Del nudo 10 parten las tomas de los riegos de la Ribera Alta. Estos se han considerado mediante dos usos: *Acequia Real y Antella* y *Escalona y Carcagente*. Ambos usos tienen tres tomas, para que la respuesta del modelo sea lo más parecido posible a la realidad: la primera corresponde al volumen de agua realmente utilizado por la planta para su desarrollo; la segunda representa el agua aplicada en la parcela que ha infiltrado directamente al acuífero; y la tercera representa el agua que se pierde en las acequias sin llegar a la parcela. La primera parte es la realmente consumida y no produce retorno; la segunda parte producirá retorno diferido mediante los aportes del acuífero al río; y la tercera parte produce un retorno directo al río.

De estos volúmenes de retorno habrá una parte que no retorne al río, sino que ira a la Albufera: del agua que circula por el retorno 4, una parte se filtra en la conducción comprendida entre los nudos 28 y 11, alimentando el acuífero 6 *Albufera*, el cual termina entregando el agua a la Albufera.

Al nudo 11 llegan los retornos superficiales de los usos agrícolas de la Ribera Alta. De aquí continúa el río Júcar hasta el nudo 12, en donde se incorporan para el modelo los afluentes Magro, Verde, Sellent y Albaida. Estos ríos se han conceptualizado como un único elemento de aportación denominado *APO5. Inferiores*. De este mismo nudo parten las tomas de los riegos de *Sueca* y *Cuatro Pueblos*. Aunque hay dos tomas, sólo una está activa. En el nudo 22 está la toma de los riegos de *Cullera*. Finalmente, el río continúa hacia el nudo 24 y de éste hacia el mar, mediante sendas conducciones simples.

7.3. Obtención de las funciones económicas

La obtención de las funciones económicas (o curvas de demanda en el caso de los usos de agua) es una tarea compleja, que casi siempre admite mayor refinamiento en su obtención.

Esta tarea (más propia de los economistas) no es el objetivo principal de esta tesis; y la única pretensión de esta sección es aplicar los conceptos teóricos expuestos en el Capítulo 3 con el objeto de conseguir unos parámetros verosímiles y lo suficientemente aproximados para utilizar los modelos desarrollados; quedando desde el comienzo abierta la puerta a posteriores aproximaciones más certeras de las aquí realizadas.

En el resto de esta sección se describe el procedimiento empleado para estimar las funciones económicas más relevantes de los elementos del SRH de la Figura 7.7.

Si bien todos los elementos pueden tener una función económica, en este caso de aplicación se asignará una *fe* sólo a: los bombeos del acuífero Mancha Oriental (que es el más efectos tiene sobre el resto del SRH), a los tramos de río con volumen mínimo, a todos los usos fuera del cauce y las centrales hidroeléctricas.

7.3.1. Usos agrícolas

Este uso es el principal consumidor de recurso hídrico. En la cuenca del Júcar se pueden distinguir dos grandes zonas de regadío bien diferenciadas, tanto por la distancia geográfica entre ellas como por los cultivos que se realizan, la técnica de riego y el origen predominante del recurso:

- la zona de aguas abajo del embalse de Tous (que incluye los riegos de la Ribera y los del canal Júcar-Turia), con cultivos arbóreos como cítricos y frutales, productos de huerta y arroz. Éstos se riegan predominantemente con agua superficial aplicada a manta (o inundación), aunque una proporción menor se riega con agua subterránea y técnicas más ahorradoras.
- la zona de Albacete, con cultivos extensivos como trigo, cebada, maíz, alfalfa y girasol. El agua es casi en su totalidad proveniente del subsuelo, del acuífero Mancha Oriental, aplicado casi siempre mediante pivote de riego central.

Usos agrícolas aguas abajo del embalse de Tous

A grandes rasgos, la distribución de cultivos en esta zona se ve en la Figura 7.9.

El arroz se cultiva en un anillo perimetral que bordea la Albufera de Valencia, y comprende los usos 21, 22, 23, y 24 en el esquema de la Figura 7.7. Los naranjos, mandarinos, otros frutales y cultivos de huerta se ubican exteriormente al anillo de arroz, y comprenden los usos 2, 3, 4, 5, 6, y 7 en la misma figura.

Ambos cultivos presentan bastante rigidez a corto plazo. Para los cultivos arbóreos esta rigidez tiene causas evidentes: la inversión que conlleva el conseguir un árbol productivo no hace fácilmente viable su cambio por otro tipo de cultivo. Para el arroz la rigidez está ocasionada porque los campos están acondicionados para éste cultivo, y porque la normativa de protección del Parque Natural de la Albufera no permite cambiar el tipo de cultivo, para facilitar la supervivencia de las aves acuáticas.



Figura 7.9: Distribución de cultivos en la zona inferior del río Júcar.

Fuentes de información

Se usaron 3 fuentes principales de información:

- La web de la Consellería de Agricultura de la Comunidad Valenciana (CA).
- Los distintos informes técnicos de la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ).
- Los datos de la base GIS del Instituto Valenciano de Irrigación (IVI)

Evidentemente cada una de estas fuentes de información tiene finalidades distintas y por ello la estructura y el detalle de los datos es también diferente. Los datos de CA están agrupados por términos municipales, mientras que los datos del IVI y de la CHJ están organizados por Unidades de Demanda Agraria (UDAs), que corresponden a la red de canales y acequias que distribuyen el agua para riego. Por lo tanto, la comparación presenta una dificultad adicional, porque no hay coincidencia entre los municipios y las UDAs. Las UDAs abarcan —parcialmente— varios municipios; y también zonas de un mismo municipio pertenecen a distintas UDAs.

Además de esta dificultad, los datos de superficies cultivadas son diferentes según las 3 fuentes, como puede verse para cada UDA en los Cuadros 7.5 a 7.7.

cultivo	Escalona y Carcagente	Canal Júcar-Turia	Acequia Real	Cuatro Pueblos ¹	Cullera	Sueca	Total
arroz			4900	1120	9890	7140	23050
arbóreos	4220	s/d	19600	600	4700	1700	30820
hortalizas	220	s/d				270	490
invernad.						50	50
Total	4440		24500	1720	14590	9160	54410

Cuadro 7.5: Superficies cultivadas [ha], IVI, año 2004.

cultivo	Escalona y Carcagente	Canal Júcar-Turia	Acequia Real	Cuatro Pueblos	Cullera	Sueca	Total
arroz			3920	2240	1410	12300	19870
arbóreos	3560	14920	13840	1130	4000	1390	38930
hortalizas	100	1060	4120	40	160	270	5750
Total	3660	15980	21880	3410	5560	14000	64550

Cuadro 7.6: Superficies cultivadas [ha], Consellería de Agricultura de Valencia, año 2002.

cultivo	Escalona y Carcagente	Canal Júcar-Turia	Acequia Real	Cuatro Pueblos + Cullera + Sueca (Ribera Baja)	Total
Total	6500	11200	17500	13800	49000

Cuadro 7.7: Superficies cultivadas [ha], CHJ, año 2002.

Desagregación del volumen de las UDAs

Los usos agrícolas del modelo de simulación precedente en la zona aguas abajo del embalse de Tous se deben desagregar, porque en estas zonas de riego conviven dos grupos de cultivos con una capacidad de pago muy distinta: arroz, y cítricos u hortalizas. Como se mencionó en la sección 3.3.2, esta conjunción de cultivos con capacidad de pago muy diferente origina una curva de demanda “escalonada” (Figura 7.10) que no puede tratarse en el programa MEvalGes.

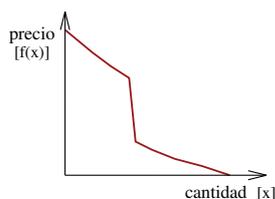


Figura 7.10: Ejemplo de curva de demanda “escalonada”.

Además, la desagregación presenta la ventaja de que se pueden extraer resultados parciales para cada clase de cultivo, posibilitando una mayor riqueza en la interpretación de los mismos.

Por ello, el objetivo de esta sección y las siguientes es desagregar los valores de volumen mensual de los usos agrícolas aguas abajo de Tous (del modelo de simulación precedente), en 3 valores de volumen correspondiente a los cultivos predominantes considerados: árboles frutales, arroz y huerta; de forma que la suma de los valores desagregados coincida con los valores del modelo precedente y manteniendo los valores de eficiencia total de cada UDA.

¹Comprende Corbera, Fortaleny, Polinyà de Xúquer y Riola.

La eficiencia total de cada zona de riego se recoge en el Cuadro 7.8.

zona	eficiencia
Escalona y Carcagente	0,35
Canal Júcar-Turía	0,75
Acequia Real	0,32
Ribera Baja ²	0,50
Mancha Oriental	0,85

Cuadro 7.8: Eficiencia de las UDAs, CHJ, datos del año 2002.

Esta eficiencia está transferida al modelo de simulación de distinta forma para las diferentes UDAs:

- a)- Los usos *Escalona y Carcagente* y *Acequia Real* tienen una toma que representa el consumo agronómico por evapotranspiración de los cultivos, por lo que el valor de eficiencia se consigue directamente por los valores de volumen establecidos para las tres tomas.
- b)- Los usos *Canal Júcar-Turía*, *Cullera*, y *Sueca* no tienen representado en el modelo los respectivos retornos ni la infiltración, por lo que los valores de volumen que figuran allí para las tomas son el volumen derivado, o volumen bruto.
- c)- El uso *Cuatro Pueblos* tiene en el modelo de simulación un coeficiente de retorno superficial de 0,3; que no alcanza para obtener el coeficiente de eficiencia de 0,5; por lo que es de suponer que hay infiltraciones que no se han representado en el modelo.

Para obtener la desagregación hace falta realizar 2 pasos sucesivos:

- Obtención del patrón mensual de volumen requerido por cada cultivo.
- Obtención del volumen mensual de cada uso agrícola para el esquema desagregado.

Obtención del patrón mensual de volumen requerido por cada cultivo

El primer paso es obtener el patrón mensual de porcentaje del volumen anual requerido, para los 3 cultivos considerados (árboles frutales, arroz y huerta). Para ello se hizo lo siguiente:

1. **Cítricos:** en la zona del uso *Escalona y Carcagente* la superficie de cultivos arbóreos representa el 96 % del total, con casi la totalidad consistente en cítricos (naranjos y mandarinos). Esto permite deducir el patrón porcentual mensual para los cítricos, a partir de los valores de la toma *Consumo neto 2*. A los efectos de la obtención del patrón de consumo de los cítricos, sólo se considera esta toma porque representa la evapotranspiración de los cultivos, mientras que las otras dos tomas representan los retornos y las infiltraciones.
2. **Arroz:** en la zona de la Ribera Baja (usos *Cuatro Pueblos*, *Cullera* y *Sueca*), hay cultivos de cítricos y de arroz, y en una proporción bastante menor de huerta. Se ha

²La Ribera Baja comprende las UDAs de Cuatro Pueblos, Cullera y Sueca.

despreciado la contribución de la huerta, suponiendo el cultivo sólo arroz y cítricos. Luego, para cada uno de estos usos se hizo lo siguiente:

- Se obtuvo el consumo neto total (CN_t) en cada mes: $CN_t = \epsilon \cdot VD$.
- Se asumió una superficie de cítricos en función de los datos disponibles y con esto se restó del consumo total el consumo de los cítricos (CN_c), quedando como remanente el consumo del arroz (CN_a): $CN_a = CN_t - CN_c$
- Se calculó el porcentaje consumido por el arroz en cada mes respecto del total anual.

Los patrones mensuales obtenidos partiendo de distintos usos presentaron una gran concordancia, por lo que uno cualquiera de ellos se adoptó como patrón porcentual mensual para el arroz.

3. **Huerta:** a partir de un modelo de simulación de la cuenca del Turia [DGOH, 1982], se utilizó el uso agrícola *Riegos Tradicionales del Turia*, en el cual se cultiva casi exclusivamente cítricos y productos de huerta; y se empleó el mismo procedimiento que en el paso anterior para obtener el consumo neto de la huerta (CN_h). Hay que mencionar que un patrón porcentual mensual de la huerta es más incierto que los de los cítricos o el arroz por la variedad de cultivos que se agrupan en esta categoría; pero a pesar de esto, se considera igualmente válida esta aproximación.

En este punto se dispone de los patrones mensuales porcentuales para los tres cultivos.

Obtención del volumen mensual de cada uso agrícola

El siguiente paso es aplicar estos patrones a cada uno de los 6 usos agrícolas del esquema (Figura 7.7) que se desagregan en dos usos. Se realizaron hipótesis simples acerca de la dotación ([C.H.J., 1999], etc.) y de las superficies de cultivos en cada zona de riego, que se pueden ver en el Cuadro 7.9; y se vio como “cierran” o “cuadran” estos valores con los originales del esquema.³

Cultivo	Acequia Real y Antella		Escalona y Carcagente		Riegos Canal Júcar-Turia	
	Superficie [ha]	Dotación [m ³ /(ha año)]	Superficie [ha]	Dotación [m ³ /(ha año)]	Superficie [ha]	Dotación [m ³ /(ha año)]
cítricos	16300	4100	4400	4100	10000	5470
arroz	2800	11000	190	5000	700	6670
huerta	3230	5000	0	-	0	-

Cultivo	Cuatro Pueblos		Cullera		Sueca	
	Superficie [ha]	Dotación [m ³ /(ha año)]	Superficie [ha]	Dotación [m ³ /(ha año)]	Superficie [ha]	Dotación [m ³ /(ha año)]
cítricos	450	5510	1610	7870	3020	7870
arroz	1000	15400	4700	22000	6700	22000
huerta	40	7000	90	10000	280	10000

Cuadro 7.9: Superficies y dotaciones adoptadas para los usos agrarios aguas abajo de Tous.

³Se podría haber planteado un interesante problema de mínimos cuadrado con múltiples restricciones, pero para evitar un trabajo excesivo se ajustaron los valores mediante un procedimiento de “prueba y error”.

En este proceso iterativo de ajuste se modificaron levemente los patrones mensuales deducidos anteriormente para los distintos cultivos, teniendo en cuenta criterios climáticos y de coherencia y continuidad en la forma de los patrones. La Figura 7.11 muestra los patrones mensuales adoptados y usados para distintos cultivos respecto del total anual.

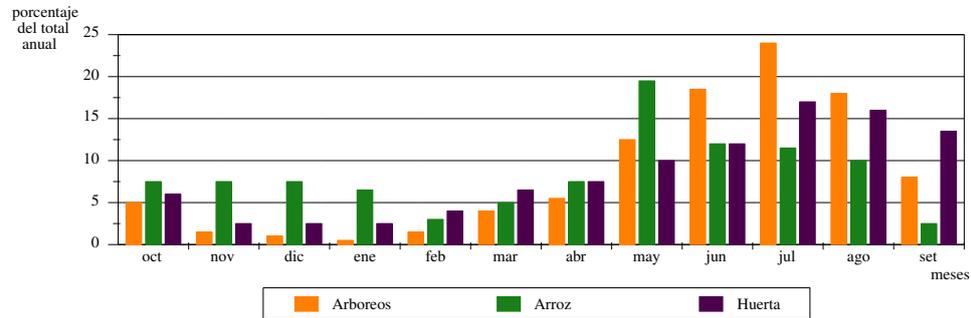


Figura 7.11: Variación mensual adoptada para los 3 monocultivos considerados.

Observaciones:

1. Lógicamente el “cierre” del proceso de prueba y error anterior no fue perfecto, y la diferencia $Dif = CN_t - \sum_{i=c,a,h} CN_i$ de cada mes se repartió de forma proporcional al porcentaje de volumen de cada cultivo $(CN_i / (\sum_{i=c,a,h} CN_i))$. Esto lleva a que en los valores finalmente adoptados, un cultivo realizado en distintas zonas no sea exactamente igual y no se verifiquen estrictamente los porcentajes de la Figura 7.11, pero sí se parecen bastante.

Estas diferencias no deben preocupar al lector, ya que hay muchos factores que varían de una zona a otra, aunque estén próximas, tales como la organización de los riegos, tipo de suelo, aspectos climáticos, variedad de cultivos, etc. Las mayores diferencias se encontraron en *Canal Júcar-Turía*, *Acequia Real* y *Sueca*. El uso *Canal Júcar-Turía* presenta una mayor variedad de cultivos: una parte del área considerada como cítrico en la simplificación realizada, corresponde en realidad a otros frutales, como melocotoneros, ciruelos, caquis, etc.; esto explica en parte que existan mayores diferencias que en otros usos agrarios. otra fuente de diferencias se debe a que algunas UDAs se abastecen de aguas subterráneas, que por ser de poca cuantía no están representadas en el modelo.

2. Por último, se sumaron los consumos correspondientes de cítricos y a las huertas, ya que tienen una capacidad de pago similar y el tratamiento conjunto evita una complicación excesiva del modelo.

Los valores finales obtenidos se presentan en el Cuadro 7.10.

Acequia Real y Antella

cultivo	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set
arbóreo	2,49	0,37	0,46	0,11	0,59	2,68	2,5	8,98	14,35	21,41	12,1	4,37
arroz	1,72	0,79	1,47	0,63	0,55	1,54	1,57	6,45	4,47	4,93	3,10	0,63
huerta	0,72	0,15	0,28	0,13	0,38	1,05	0,82	1,74	2,25	3,66	2,60	1,78
Suma	4,94	1,30	2,21	0,87	1,53	5,27	4,89	17,16	21,07	30,00	17,80	6,78

Escalona y Carcagente

cultivo	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set
arbóreo	0,78	0,20	0,33	0,11	0,22	0,81	0,76	2,75	3,40	4,83	2,84	1,04
huerta	0,05	0,02	0,04	0,03	0,03	0,07	0,05	0,12	0,12	0,18	0,13	0,09
Suma	0,83	0,22	0,37	0,14	0,26	0,88	0,82	2,87	3,52	5,01	2,97	1,13

Riegos Canal Júcar-Turia

cultivo	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set
arbóreo	5,44	1,05	0,49	0,00	0,00	0,00	2,69	4,49	9,10	11,88	11,71	8,39
huerta	0,56	0,15	0,11	0,00	0,00	0,00	0,31	0,31	0,50	0,72	0,89	1,21
Suma	6,00	1,20	0,60	0,00	0,00	0,00	3,00	4,80	9,60	12,60	12,60	9,60

Cuatro Pueblos

cultivo	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set
arbóreo	0,14	0,05	0,03	0,01	0,04	0,10	0,13	0,27	0,41	0,52	0,44	0,23
arroz	1,30	1,40	1,41	1,07	0,49	0,79	1,12	2,62	1,74	1,62	1,52	0,45
huerta	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,04
Suma	1,46	1,46	1,46	1,09	0,55	0,91	1,27	2,91	2,18	2,18	2,00	0,73

Cullera

cultivo	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set
arbóreo	0,70	0,24	0,16	0,07	0,20	0,52	0,67	1,36	2,14	2,74	2,30	1,28
arroz	8,60	9,09	9,17	6,93	3,27	5,27	7,46	17,28	11,80	11,17	10,42	3,25
huerta	0,06	0,03	0,03	0,02	0,04	0,06	0,06	0,08	0,10	0,14	0,15	0,15
Suma	9,36	9,36	9,36	7,02	3,51	5,85	8,19	18,72	14,04	14,04	12,87	4,68

Sueca

cultivo	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set
arbóreo	1,33	0,46	0,31	0,13	0,38	0,97	1,27	2,59	3,97	4,99	4,21	2,22
arroz	12,40	13,37	13,52	10,24	4,72	7,54	10,71	25,01	16,61	15,47	14,49	4,30
huerta	0,19	0,09	0,09	0,07	0,12	0,19	0,20	0,24	0,30	0,42	0,44	0,44
Suma	13,92	13,92	13,92	10,44	5,22	8,70	12,18	27,84	20,88	20,88	19,14	6,96

Cuadro 7.10: Volumen mensual [hm^3] para cada tipo de cultivo y UDA.

Disposición de pago

La estimación de la disposición de pago se basa en [Sumpsi Viñas et al., 1998], que es la única referencia con valores numéricos de curvas de demanda de agua para uso agrícola en España. Esas curvas de demanda se reproducen en la Figura 7.12.

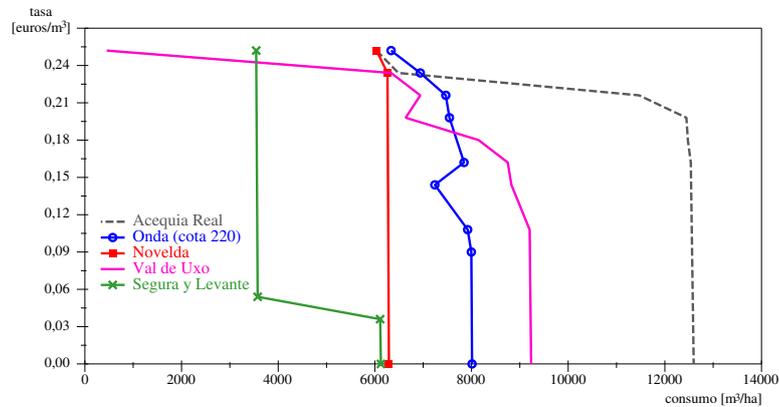


Figura 7.12: Curvas de demanda agrarias en el ámbito de la CHJ.

En la relación representada por la curva de demanda, las primeras reducciones de volumen se deben a aplicaciones más cuidadosas del agua (ahorros) en los métodos de distribución y aplicación. Para precios más elevados del agua aparece el efecto de abandono de la explotación por pérdida de rentabilidad.

Hay que mencionar que, evidentemente, el tramo que mejor se puede conocer de la curva de demanda es el más próximo a las condiciones actuales, o sea para disposiciones de pago bajas. Las hipótesis acerca de la forma de la curva para valores de volumen bajos es una “audacia” que realizamos de forma lo más razonable posible.

En función de los resultados de la mencionada referencia, se adoptaron 2 puntos cercanos por los que pasará la curva de demanda. Los valores de disposición de pago límite adoptados para estos puntos para cada monocultivo son los que muestra el Cuadro 7.11.

cultivo	subsidiado	inicio [€/m³]	final [€/m³]	observaciones
arroz	si	0,005	0,030	sin datos sólidos.
cereales y oleaginosas	si	0,002	0,060	sin datos sólidos.
cítrico	no	0,010	0,250	datos de Castellón. ⁴
hortalizas y otros	no	0,010	0,300	minorando los de Almería.

Cuadro 7.11: Valores adoptados para la construcción de las curvas de demanda de monocultivos.

⁴[Sumpsi Viñas et al., 1998]

Como los valores del cuadro anterior representan la disposición de pago total (a pie de la parcela) por parte de los agricultores, esos valores incluyen los costos de distribución y aplicación (fundamentalmente el regador), que hay que descontar.

Del detallado trabajo de [García Mollá, 2000] se obtuvo que el costo del regador puede suponer aproximadamente un 25 % del costo del riego. Por esto, para obtener la disposición a pagar sólo por el agua hay que reducir los valores del Cuadro 7.11 en esta proporción.

Con los valores del Cuadro 7.10 y los valores del Cuadro 7.11 corregidos se construyen las curvas de demanda que se presentan en las Figuras 7.13 y 7.14.

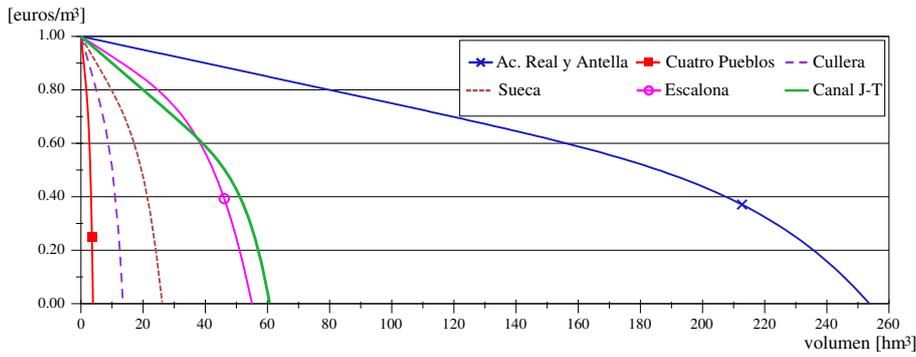


Figura 7.13: Curvas de demanda de agua para regar cítricos y huerta (anual) variante.

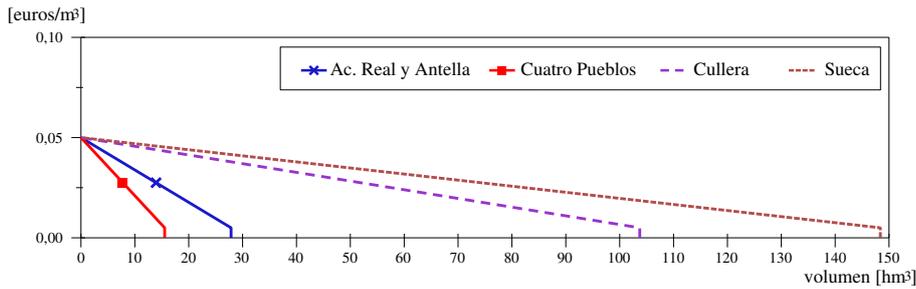


Figura 7.14: Curvas de demanda de agua para regar arroz (anual).

Precios actuales

Los valores obtenidos para el riego de arroz se comparan con los valores obtenidos de [García Mollá, 2000] (pág. 142): el Sindicato de Riegos de Sueca cobra entre 15000 y 35000 *ptas/ha*, una parte de lo cual corresponde al mantenimiento de la red de acequias utilizadas. Se elige un valor alto de 30000 *ptas/ha* o 180 €/ha, y se considera que de éstos 100 €/ha corresponden al agua. Utilizando la dotación del Cuadro 7.9, resulta un precio de 0,0045 €/m³.

Este valor es coincidente con el valor medio para el arroz del Cuadro 7.12 de la mencionada referencia, que se reproduce a continuación.

cultivo	valor	tarifas [ptas/ha]	precio riego [ptas/m ³]	consumo [m ³]	entidad
arroz	máximo	11.700	0,39	30.000	Acequia Real del Júcar
	medio	28.571	0,96	29.800	
	mínimo	48.600	1,62	30.000	Acequia Real del Júcar
cítricos	máximo	14.976	2,08	7.200	S. de Riegos del Segura
	medio	118.539	15,17	7.600	
	mínimo	492.000	56,94	8.640	S.C. de La Safor
frutales	máximo	26.266	6,08	4.320	Canal Júcar-Turía
	medio	76.712	14,70	5.286	
	mínimo	114.816	23,92	4.800	C.RR. de Levante M.I.
hortalizas	máximo	15.034	0,87	17.280	S. de Riegos de Sueca
	medio	152.033	13,49	14.063	
	mínimo	299.981	14,88	20.160	Canal Júcar-Turía
uva de mesa	máximo	155.650	28,30	5.500	C. de Aguas de Novelda
	medio	253.463	48,50	5.296	
	mínimo	305.069	65,13	4.648	S.A.T de Aspe

Cuadro 7.12: Coste del riego por cultivo, tomado de [García Mollá, 2000].

El Cuadro 7.13 muestra la influencia del tipo de entidad organizadora del sistema de riego en el costo actual del agua para riego.

tipo de entidades de regantes	coste del riego [ptas/m ³]
Tradicionales	0,39-18,00
Tradicionales derivadas de planes del Estado	17,42-35,07
Tradicionales con dotaciones mixtas	6,67-27,00
derivadas de planes del Estado	3,31-21,71
riego con aguas subterráneas	13,67-65,13

Cuadro 7.13: Coste del riego por tipo de entidades, tomado de [García Mollá, 2000].

Ambos cuadros muestran la gran dispersión de precios repercutidos a los usuarios, aún entre zonas geográficamente muy próximas.

Actualmente la CHJ está realizando una recopilación más detallada de los costos pagados por los usuarios, como parte de la información requerida para la aplicación de la DMA.

Uso agrícola en la zona de Albacete

En esta zona se cultivan distintas plantas en cada estación [Font Vicent, 2004], tal como muestra el Cuadro 7.14.

ciclo	cultivo
primavera	cebada, trigo
verano	maíz, girasol, remolacha, cebolla maíz forrajero, tomate, judía verde
primavera-verano	alfalfa

Cuadro 7.14: Cultivos predominantes en cada estación en la zona de Albacete.

Las rotaciones entre cultivos responden a razones agronómicas, siendo los cultivos extensivos en una primera aproximación igualmente rentables para el agricultor.

La característica dominante de este uso desde el punto de vista económico, es la influencia de los subsidios de la Política Agraria Comunitaria (PAC) europea. Éstos comienzan a otorgarse en el año 1986, pero son especialmente importantes a partir del año 1992.

Las Figuras 7.15 y 7.16 (tomadas de [Ferrer Polo et al., 2002]) muestran que la superficie regada ha crecido de forma sostenida, desde hace dos décadas; y la consecuente disminución de los niveles piezométricos del acuífero del cual se realizan las extracciones.

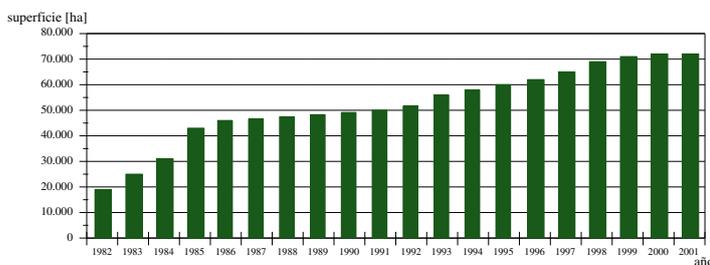


Figura 7.15: Evolución de la superficie regada en la zona de Albacete.

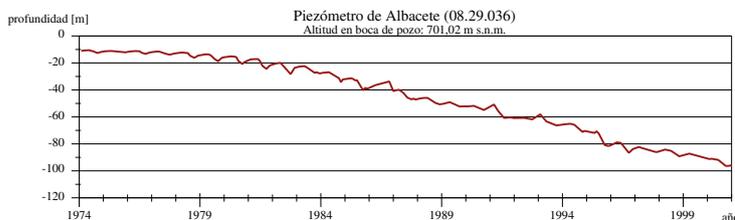


Figura 7.16: Evolución del nivel piezométrico en Albacete, acuífero Mancha Oriental.

De estas figuras se deduce que el aumento del costo del agua por el descenso piezométrico es despreciable en la cuenta de beneficios de los agricultores.

Curva de demanda

Dado que en esta zona se cultivan múltiples vegetales, el encarecimiento del precio del agua supondrá que los menos rentables dejan de producirse, por lo que la curva de demanda de esta zona será continua (sin escalones).

La curva de demanda se obtuvo de [MMA, 2004], respetando ésta curva lineal a tramos, se ajustó una función económica con pendiente descendente que se ve en la Figura 7.17.

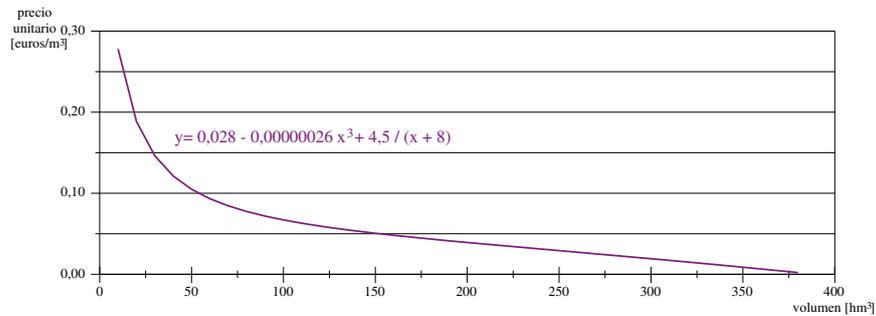


Figura 7.17: Curva de demanda para los riegos de Albacete (anual).

Es interesante comprobar que el volumen demandado para un precio del orden del costo de bombeo (0,06 €) el volumen es de 120 hm^3 . Esto coincide con la opinión de los expertos consultados, que estimaron que en caso de desaparecer las ayudas de la PAC sólo permanecería alrededor del 30 % de los cultivos, y un 30 % del volumen anual actualmente requerido en el modelo son 133 hm^3 .

7.3.2. Usos urbanos

Los usos urbanos en el esquema de la Figura 7.7 son: *Valencia*, *Sagunto*, *Albacete*, *Marina Baja ATS*. Estos se pueden agrupar en 2 clases:

- Ciudades sin marcado efecto estacional: los usos *Valencia*, *Sagunto*, *Albacete* tienen una variación mensual pequeña. Los meses se pueden dividir en dos grupos: de octubre a mayo y de junio a setiembre. De cualquier forma, la diferencia entre estos no es grande, porque en el verano el efecto de la población que se va de vacaciones compensa el mayor consumo de los que se quedan.
- Ciudades con marcado efecto estacional: el uso *Marina Baja ATS* presenta una fuerte variación estacional, provocada por el turismo costero en los meses de verano, reflejada en la Figura 7.18. Debido a esta componente del sector servicios a este uso se le asigna una capacidad de pago máxima un 30 % mayor que a los restantes usos urbanos.

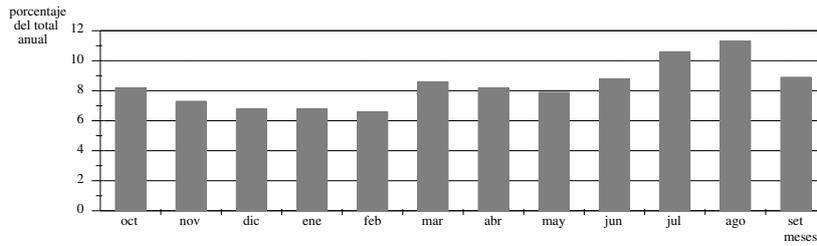


Figura 7.18: Variación mensual del uso urbano en Marina Baja ATS.

Para todos los usos, se asume un consumo medio *per cápita* de 230 l/(*dia · hab*), y un mes de 30 días. Con esto se obtienen las poblaciones servidas del Cuadro 7.15.

Uso	Volumen mín. [hm ³]	Volumen máx. [hm ³]	Habitantes
Albacete	1,494	1,512	215000
Marina Baja ATS	0,816	1,356	114000 a 197000
Sagunto	0,996	1,008	142000
Valencia	7,886	7,980	1132000

Cuadro 7.15: Poblaciones de los usos urbanos.

En la Figura 7.19 se representa la relación costo unitario vs. consumo diario *per cápita* para los abastecimientos de ciudades en la Comunidad Valenciana. Estos costos son utilizados por las empresas suministradoras para justificar ante la autoridad la aprobación de tarifas. El punto destacado corresponde a Valencia, con coordenadas (171; 0,40).

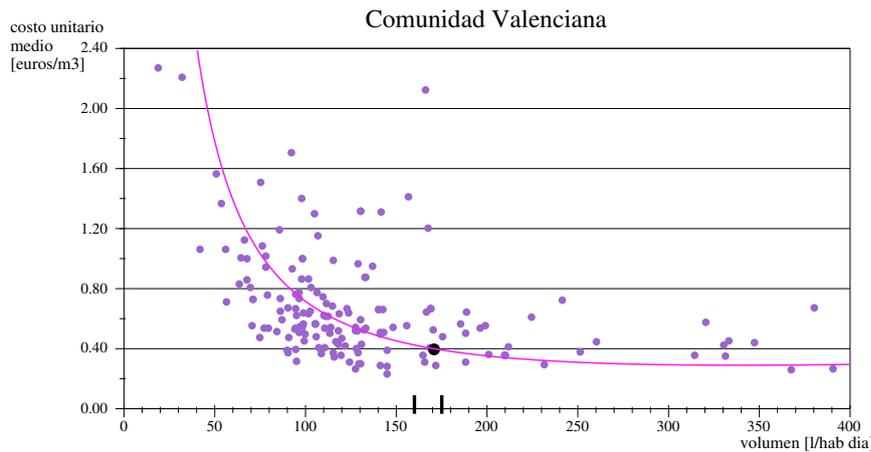


Figura 7.19: Relación costo unitario medio-consumo diario *per cápita* en abastecimientos.

Precio medio del agua en la ciudad de Valencia: 1,0 €/m³ según [MMA, 2001], muy cercano a los valores dados por [AEAS-AGA, 2003]. Esta última fuente reporta también

que en promedio los costes por consumo de explotación y personal suponen casi dos tercios del total.

Ciudad de Valencia

Para obtener el valor de disposición de pago para uso urbano en la ciudad de Valencia se siguen los siguientes razonamientos:

- El cánon pagado a la CHJ por la empresa suministradora es actualmente $0,02 \text{ €/m}^3$ (un 4,75% del costo total). Entonces el 1er punto de la curva de demanda tiene coordenadas (171; 0,02).
- De [MMA, 2001] (tomo 5, pág. 145) se obtiene que el costo medio de captación, tratamiento y distribución en la Comunidad Valenciana es de $1,19 \text{ €/m}^3$ (198 ptas/m³).
- De la Figura 7.20 se puede apreciar que recién para valores cercanos a $1,80 \text{ €/m}^3$ (300 ptas/m³) se empiezan a producir reducciones en el uso doméstico. El uso industrial, que también está incluido dentro del uso urbano es en cambio más elástico (Figura 7.21).

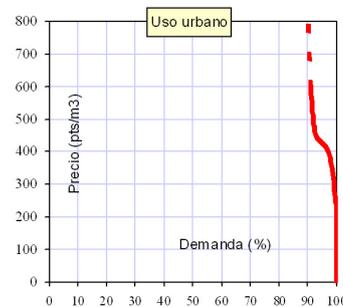


Figura 7.20: Curvas de requerimiento admisible (orientativo) MOPTMA (1995).

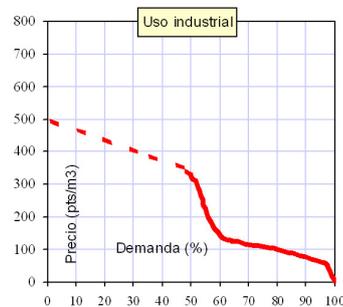


Figura 7.21: Curvas de requerimiento admisible (orientativo) MOPTMA (1995).

- Sabiendo que la demanda urbana de Valencia es fundamentalmente doméstica, podemos asumir (de forma prudente), que hasta un valor de $1,37 \text{ €/m}^3$ se estaría en disposición de pagar sin aplicar reducciones de consumo doméstico.
- Esto significa que puede haber un aumento de $0,18 \text{ €/m}^3$, con lo que la nueva capacidad de pago sería de $0,20 \text{ €/m}^3$. También suponemos que correspondientemente habrá una reducción de aproximadamente un 3% en el volumen, ocasionado por la componente industrial y de servicios.
- De esta forma, el 2do punto de la curva de demanda de agua cruda tendrá coordenadas (166; 0,20).

En este momento, hay que definir una curva de demanda por los dos puntos anteriores. Una opción es usar una curva de elasticidad constante que pase por estos puntos, con una elasticidad entre -0,35 y -0,50. Sin embargo, esto presenta el siguiente inconveniente numérico: cuando se hace la integral de la función $f = k \cdot x^g$ con un valor $-1 < g < 0$ los valores de la integral son negativos, lo que complica la obtención del beneficio neto de la gestión. Además, los valores resultantes de la modelación siempre se moverán en valores próximos a los niveles actuales de suministro (indicado con unas marcas gruesas en el eje x de la Figura 7.19), debido a lo prioritarias que resultan estas demandas, por lo que no es importante la forma que tendrá la curva de demanda adoptada lejos del punto actual. Por este motivo se prefiere adoptar un ajuste lineal y evitar problemas.

Finalmente, hay que compatibilizar el valor de volumen anual con el valor del modelo precedente, hecho lo cual se obtiene que la curva de demanda lineal para la ciudad de Valencia responde a la ecuación: $y = 6,02 - 0,063158 \cdot x$.

Todas las ciudades

Para obtener las curvas de demanda de los restantes usos urbanos simplemente se escala el eje de volumen con los valores anuales del modelo de simulación para cada uso. Como ya se mencionó, el valor máximo del uso *Marina Baja ATS* se mayor a un 30%. Las curvas de demanda están representadas en la Figura 7.22.

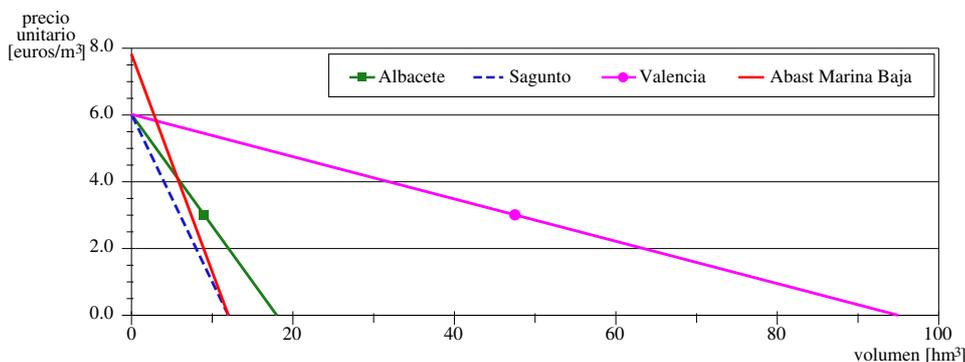


Figura 7.22: Curvas de demanda urbanas (anuales).

7.3.3. Uso industrial

Este uso comprende exclusivamente la refrigeración de la Central Nuclear de Cofrentes. Una central nuclear no puede funcionar sin refrigeración, por lo que la disposición a pagar en este uso será muy alta; lo que también se refleja también en el modelo de simulación al tener prioridad 1.

Como este uso siempre estará completamente abastecido gracias a la prioridad asignada, para los cálculos diferenciales da lo mismo el valor unitario que se adopte para el agua suministrada. Para adoptar un valor aproximado se siguieron estos pasos:

1. La central tiene una potencia de 1085 *Mw*.
2. Suponiendo que trabaja ininterrumpidamente durante 27 días al mes significa una producción mensual de 700 *Gwh/mes*.
3. A un precio unitario de 0,022 €/kwh son 15400000 € de facturación mensual.
4. Asumiendo que el beneficio es del orden del 15 %, sería de 2310000 € al mes.
5. Suponiendo que la disposición a pagar por el agua sea el 15 % de esta cantidad, esto es 3645000 € al mes.
6. Dividido por los 2900000 m^3 suministrados en cada mes, resulta un valor unitario de aproximadamente 0,12 €/m³.

La curva de demanda para este uso se ve en la Figura 7.23.

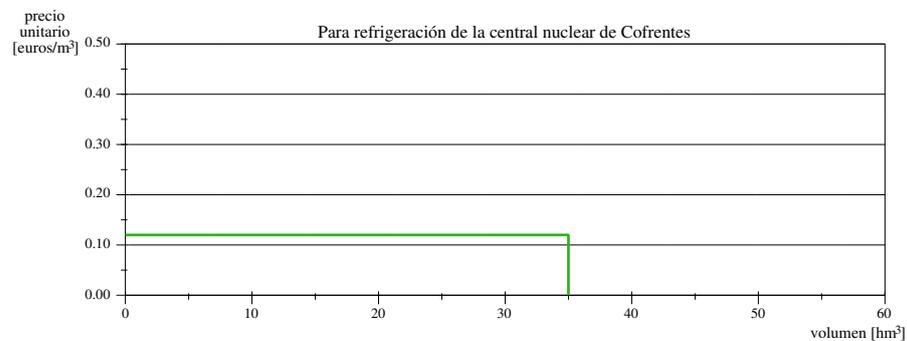


Figura 7.23: Curva de demanda del uso industrial (anual).

7.3.4. Uso hidroeléctrico

Se asume una curva de demanda constante para cada mes, ya que las centrales consideradas están conectadas a una red de gran capacidad comparada con la propia capacidad de generación de las centrales.

Las tres centrales existentes (*Cofrentes*, *Cortes II* y *Millares*) generan energía en hora punta, durante aproximadamente 8 *hs* al día. El precio de la energía varía a lo largo del día, de la semana y de los meses (ver sección 3.3.3). A los efectos de esta modelación, se agrupan los meses en dos categorías: meses normales y meses de verano.

Para determinar el precio de la energía en horas punta se recurrió a la página web de la Red Eléctrica Española (<http://www.ree.es>), y del mercado eléctrico se obtuvieron los valores que figuran en el Cuadro 7.16.

meses	valor de la energía
oct-may	0,032 €/kwh
jun-set	0,042 €/kwh

Cuadro 7.16: Valor de la energía hidroeléctrica adoptado.

Pero todo este valor no puede achacarse al agua, sino que hay muchos otros costos de la generación de energía. Asumimos que el beneficio representa el 15% del valor de mercado, y que las compañías eléctricas están dispuestas a pagar un 10% del precio de la energía, obteniéndose finalmente los valores del Cuadro 7.17.

meses	disposición a pagar
oct-may	0,0032 €/kwh ⁵
jun-set	0,0042 €/kwh

Cuadro 7.17: Valor de la disposición a pagar para uso hidroeléctrico.

Como la diferencia en los valores no es demasiado grande, se optó en una primera aproximación en emplear un único valor, igual a 0,0036 €/kwh. Si al obtener los resultados la componente hidroeléctrica tuviera suficiente importancia (cosa que no sucedió finalmente), se utilizaría un valor distinto en cada grupo de meses.

La curva de demanda para este uso se ve en la Figura 7.24. Observar que el eje x es ahora de unidades de energía [kwh] en vez de las unidades habituales de volumen [hm³].

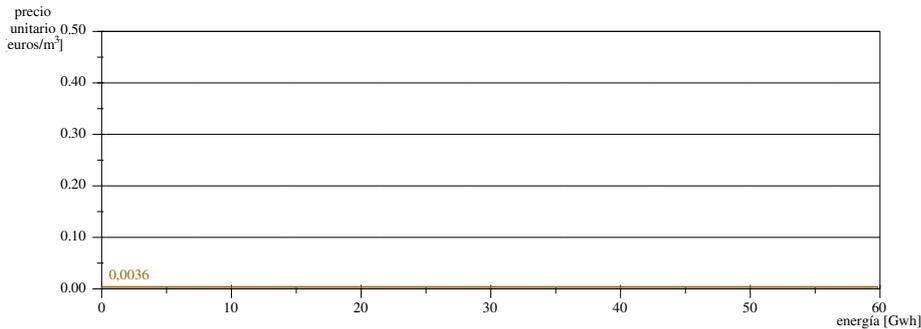


Figura 7.24: Curva de demanda de los usos hidroeléctricos.

En el modelo SimGes se ha utilizado un coeficiente energético (CE), $CE = \eta \cdot 0,002725 = 0,7 \cdot 0,002725 = 0,002$ igual para las tres centrales.

⁵ €/kwh es equivalente a M €/Gwh.

El funcionamiento de las plantas hidroeléctricas está subrogado a las necesidades urbanas y agrícolas: las centrales turbinan cuando la Comisión de Desembalse de la cuenca determina que ha de haber sueltas para estos usos. En los últimos tiempos las centrales están modificando esta forma de operar gracias a la entrada en funcionamiento de contraembalses, que permiten turbinar durante las 8 hs del día con un precio mayor de energía y cumplir con el mandato de la Comisión de Desembalse.

7.3.5. Uso ambiental

Este uso abarca los beneficios ambientales que reporta el agua. En una primera aproximación, donde existe una restricción operativa de la gestión con fines ambientales, se está reconociendo implícitamente que hay beneficios para la sociedad.

En el modelo construido (Figura 7.7) los tramos de río que tienen caudales ecológicos están indicados en el Cuadro 7.18.

tramo de río	Mínimo volumen mínimo mensual [hm^3]	Suma anual de volúmenes mínimos mensuales [hm^3]	Volumen máximo circulante [hm^3] ⁶
Júcar-1	5,00	63,07	254,3
Júcar-5	0,70	9,49	145,4
Júcar-7	1,58	18,97	1,6
Cabriel-1	1,10	12,62	145,5
Salidas Tous Río	1,60	18,96	91,5

Cuadro 7.18: Volumen mínimo en tramos de río.

El volumen mínimo de *Salidas Tous Río* no condiciona la gestión, porque los usos inferiores al embalse de Tous requieren sueltas mayores al volumen mínimo establecido en el modelo; de forma que durante todo el período simulado se cumple con mucha holgura esta condición. Por este motivo se ha preferido no valorar el flujo en este tramo de río.

La dificultad está en establecer un valor para el agua que circula por estos tramos de río, dado que no hay estudios de valoración ambiental en la CHJ. Dada esta circunstancia, se proponen una curvas de demanda de acuerdo a criterios empíricos acerca de la forma de las mismas [Díaz y Brown, 1999]. Los criterios usados son:

1. Las curvas de beneficio neto tienen forma de U invertida, con el máximo para valores superiores al volumen mínimo y con valores próximos a 1 para los máximos que ocurren en el período simulado. Esto evita que en las crecidas se consiga un beneficio desorbitado, como ocurriría si se usara un beneficio unitario constante.
2. Para un volumen determinado, el valor unitario será directamente proporcional a la longitud aguas abajo del elemento considerado.

⁶Dato a fines comparativo, según la simulación realizada con el modelo MEvalGes.

3. Donde hay varios tramos consecutivos con uso ambiental, intentar que la suma del valor unitario para los valores de volumen mínimo especificados en el modelo sea similar en los distintos afluentes.
4. Que el peso del uso ambiental sea “razonable” comparado con el peso de otros sectores, por ejemplo que en total sea menor al 10 % del uso agrario.

La Figura 7.25 muestra las curvas adoptadas finalmente para este uso.

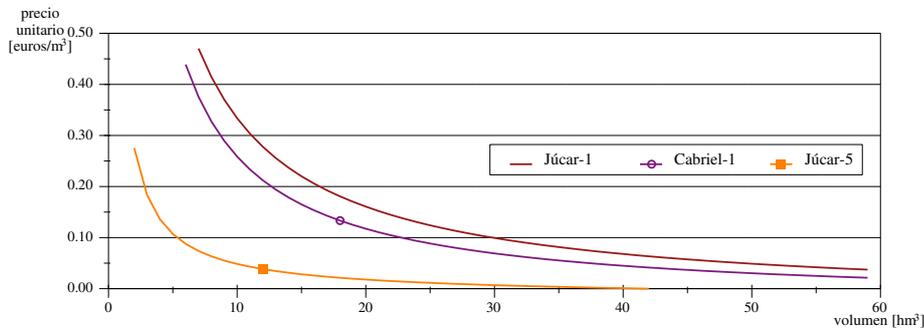


Figura 7.25: Curvas de demanda de los usos ambientales.

7.3.6. Bombeos del acuífero Mancha Oriental

La Unidad Geológica Mancha Oriental (08.29) está compuesta por 4 acuíferos. El acuífero superior (libre) es el de mayor importancia porque de él se realizan la mayoría de las extracciones. El espesor de este acuífero llega en zonas a 150 m, y los materiales que lo componen son calizos con presencia de zonas arcillosas.

Costo de extracción

El costo unitario total de bombear agua (c) responde a la siguiente ecuación:

$$c = cf + ce \cdot p \tag{7.1}$$

Siendo: cf : costos fijos (amortización, mantenimiento, etc.).

ce : costo energético.

p : profundidad de referencia.

Costos fijos

En base al estudio [C.H.J., 2004], y a diversas consideraciones sobre el tiempo medio anual de funcionamiento, cantidad de pozos usados para extraer una unidad de agua, etc.; se adoptó un valor de:

$$cf[\text{€}/m^3] = 0,03 \tag{7.2}$$

Costo energético

Para obtener el consumo energético de bombeo desde una profundidad p , se utilizan las conocidas ecuaciones de potencia y de energía (7.3).

$$P[kw] = \frac{9,81}{\eta} \cdot p[m] \cdot Q_e[m^3/s] \qquad E[kwh] = P[kw] \cdot t[h] \qquad (7.3)$$

- Siendo:
- η : rendimiento global (valor adoptado: $\eta = 0,7$).
 - p : profundidad (o altura neta).
 - Q_e : caudal extraído.

Si se extrae $1 \text{ m}^3/s$ durante 1 hora, finalmente se extraen 3600 m^3 , por lo que la energía necesaria por cada unidad de volumen (e) es:

$$e[kwh/m^3] = \frac{9,81}{0,7 \cdot 3600} \cdot p[m] = 0,0039 \cdot p[m] \qquad (7.4)$$

Se adoptan los siguientes costos de la energía: término de energía de $0,065 \text{ €/kwh}$, y término de potencia representa un 20% del término de energía; el costo total de la energía es de $0,078 \text{ €/kwh}$. De forma que finalmente, el costo energético (ce) es:

$$ce[€/m^3] = 0,000304 \cdot p[m] \qquad (7.5)$$

Relación profundidad-volumen

Seguidamente se estimó la relación entre el volumen almacenado en el acuífero con un piezómetro representativo de la zona de las mayores extracciones. Los datos de profundidad provienen de valores medidos en el piezómetro de Albacete (08.29.036), con una altitud en la boca del piezómetro de $701,02 \text{ [m]}$ s.n.m. Los datos de volumen almacenado provienen del ajuste de los bombeos históricos y los datos de profundidad a un modelo de dos celdas del acuífero [Herrero Miñano, 2002]. Esta relación se muestra en la Figura 7.26.

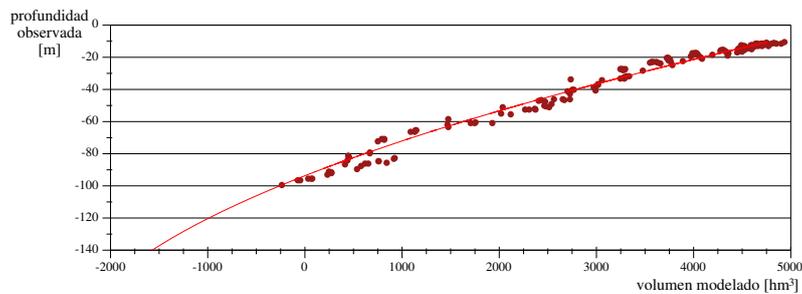


Figura 7.26: Relación profundidad-volumen modelado en el acuífero Mancha Oriental.

Sorprende lo regular que resulta esta relación, pero se explica por el hecho de que los valores de volumen provienen de un modelo agregado y simple, dando lugar a una relación “suave” y continua, que es poco frecuente de encontrar si se tratara de valores observados.

Como este acuífero se simula por superposición, el volumen inicial del mismo en el modelo de simulación debe corresponder a la afección que presenta sobre el régimen natural en la fecha en la que se modela el SRH (año 2001). De esta forma, el valor de volumen a utilizar en la relación profundidad-volumen no es el modelado (V_m , Figura 7.26), sino el volumen de superposición (V_s), siendo: $V_s = V_m - 3640,4$. La relación aproximada que se ha adoptado es la siguiente:

$$p[m] = 26,0 - 0,014 \cdot V_s[hm^3] + 0,000014 \cdot V_s^2[hm^3] \tag{7.6}$$

siendo p : profundidad del pozo de referencia. Este valor de p representa la profundidad estática más un término fijo de 10 m, adicionado para considerar el descenso dinámico durante el bombeo. La profundidad que corresponde al volumen inicial es de 95,5 m.

7.3.7. Recapitulación de datos económicos

Una vez obtenidas las funciones económicas para los usos agrícola, industrial y urbano, se han representado todas juntas en las Figuras 7.27 y 7.28, para que el lector tenga idea de los valores relativos en c/u de ellas.

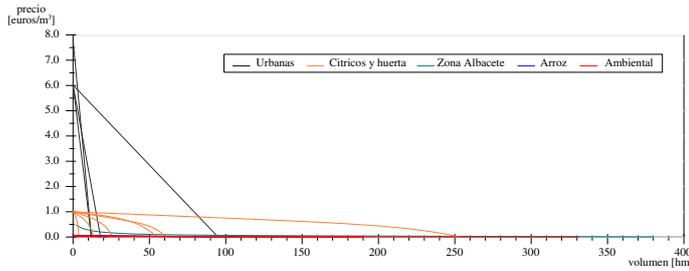


Figura 7.27: Curvas de demanda anuales utilizadas.

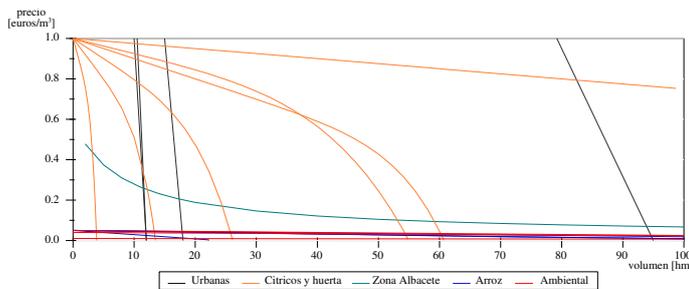


Figura 7.28: Curvas de demanda anuales utilizadas (detalle).

En cuanto a la confiabilidad de las distintas funciones económicas, se puede decir lo siguiente:

- Las curvas de demanda urbana se consideran bastante aceptables en el rango correspondiente al valor actual y al estrecho rango en el cual varía el volumen suministrado.
- Para el uso industrial de refrigeración de la Central Nuclear, el valor adoptado es un límite inferior de capacidad de pago, ya que se estima que podrían pagarse precios mayores si fuera necesario.
- La curva de costos de bombeos del acuífero *Mancha Oriental* se considera bastante ajustado, por coincidir con otras estimaciones provenientes de la CHJ y por el rigor de la formulación que lleva a su obtención.
- De las curvas de demanda para usos agrícolas, el orden de confiabilidad de mayor a menor sería: en primer lugar la de cítricos, frutales y huerta; luego la de cereales y oleaginosas, y finalmente con menor confiabilidad la curva de demanda para el riego del arroz. Estos usos cargan además con la dificultad adicional antes mencionada en la no concordancia del volumen utilizado según las distintas fuentes, debido a que no se miden los volúmenes derivados.
- Por último, la función económica de los usos ambientales es la menos defendible de todas, ya que se ha obtenido usando criterios empíricos.

Aunque evidentemente sería deseable disponer de estudios económicos sectoriales más detallados, estos están fuera de las posibilidades y capacidades de este trabajo, aunque podrían ser emprendidos por la autoridad competente.

7.4. Aplicación de MEvalGes

7.4.1. Modelo del sistema de recursos hídricos

Modelo precedente

Como ya se dijo con anterioridad, el punto de partida para este estudio económico ha sido el trabajo [MS, 2002]. El modelo del SRH del Júcar de allí extraído (Figura 7.7) comprende el denominado “sistema de explotación” que además de la cuenca natural, incluye los canales que distribuyen el agua para riego en la zona baja de la cuenca.

Sobre este modelo se han realizado algunas adaptaciones para aprovechar al máximo los datos disponibles.

Cambios realizados en el modelo

Para realizar el análisis económico de la gestión, resulta necesario realizar ciertos cambios en el esquema de la Figura 7.7, los cuales se enuncian a continuación:

1. Se desdoblaron los usos agrarios 2, 4, 5 y 6 de la Figura 7.7 en dos usos que sumados dan el valor original: uno corresponde a la fracción correspondiente al riego de arroz y el otro a la fracción correspondiente al riego de árboles y huerta. Se verificó que la suma de los retornos y la suma del volumen derivado por las tomas desdobladas respectivas coinciden con los valores originales.
2. Para una mejor representación de la realidad espacial, se agregaron dos tramos de conducción que representan la Acequia Real del Júcar, y un tramo que representa los sobrantes de esta acequia. Este tramo final nunca llevará agua, pero permite eliminar el retorno número 5 que sólo estaba para conseguir una red cerrada.
3. Se agregaron tres centrales hidroeléctricas: Cofrentes, Cortes II y Millares. La inclusión de estas centrales obligó a realizar ajustes en el modelo a fin de reproducir la forma de gestión real del sistema. El criterio de gestión es el siguiente: el agua se suelta de los embalses de cabecera para atender los usos agrícolas, y ese agua se aprovecha también con fines hidroeléctricos; pero no hay sueltas específicas para generar electricidad. La dificultad radicó en conseguir simultáneamente la no existencia de sueltas con fines hidroeléctricos y la preferencia de hacer circular el agua por la central en vez de por el tramo de río en paralelo de ésta. Esto finalmente se consiguió estableciendo $CKN= 1$; $CS= 1$; $CDN= 0$ para las centrales y un coste de flujo $Cf=1$ para el tramo de río *Júcar-4*.

También se hicieron otros cambios para mejorar la representatividad del modelo en ciertas zonas del SRH:

1. El tramo de río *Júcar-Mancha* (conectado con el acuífero *Mancha Oriental*) se desplazó hacia aguas arriba, lo mismo que la aportación 1 *Alarcón-Molinar*.
2. La evaporación del pequeño reservorio superior de la central hidroeléctrica de La Muela que antes se modelaba como un uso, ahora se ha modelado más convenientemente como un embalse *Emb-Muela*, manteniendo en los valores correctos las pérdidas por evaporación.
3. El tramo de río *Júcar-5*, aguas abajo del embalse de Molinar tiene ahora un volumen mínimo mensual de $0,791 \text{ hm}^3$ (fuente Iberdrola).
4. El azud de *El Molinar* se representa ahora como un embalse (pequeño), considerando la evaporación del mismo.
5. En el río Cabriel, el tramo de río receptor de las filtraciones se ha desplazado hacia aguas arriba, al *Cabriel-1*.
6. Los tramos de río *Cabriel-3* y *Júcar-6* tienen en la realidad una longitud muy corta.
7. La toma de la central Nuclear de Cofrentes se ha colocado en el embalse de Cortes, como efectivamente está construido.
8. Se ha eliminado el acuífero *ACU Tous* porque no aportaba mejoras en la representación y complicaba el esquema. Esto permitió eliminar la conducción *C2-3* y simplificar la entrada de la aportación *Contreras-Molinar-Tous*.

Finalmente se hicieron otros cambios innecesarios para el análisis económico, pero requeridos para la simulación de calidad de agua que se realiza simultáneamente en el IIAMA. Así se usa un mismo esquema para el análisis económico y para el análisis de calidad, lo cual es evidentemente conveniente. Estos cambios resultan inocuos para el análisis económico y son los siguientes:

1. La aportación 5 *Inferiores* se desagrega en 4 aportaciones con distinta localización, que sumadas mantienen el volumen total original. Las aportaciones nuevas son:
 - *Sellent*
 - *Albaida*
 - *Verde*
 - *Magro*
 con porcentajes de 11,2%, 52%, 24,4% y 12% respectivamente de la aportación total.
2. Se agregan más cantidad de tramos de río aguas abajo del embalse de *Tous*.

Esquema utilizado

El resultado de las modificaciones anteriores es el esquema que muestra la Figura 7.29.

7.4.2. Resultados del caso inicial

Por motivos de extensión sólo se presentan y comentan los resultado más relevantes.

La transcripción del archivo económico utilizado se encuentra en el Apéndice F.

La Figura 7.30 muestra la suma del almacenamiento en los principales embalses del sistema (Alarcón, Contreras y Tous) durante el período de tiempo simulado. Claramente se aprecia el período seco que afecta a los últimos 20 años.

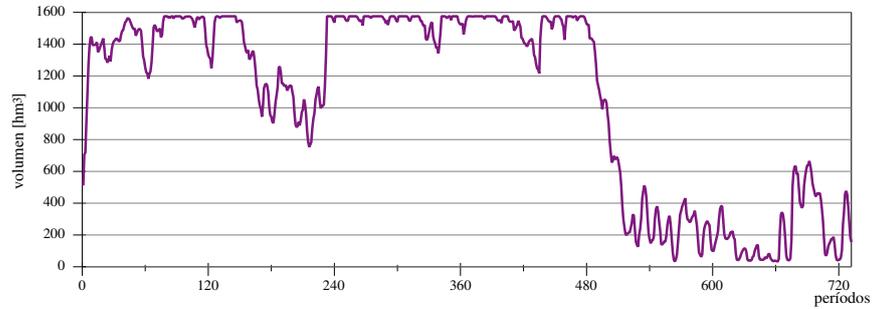


Figura 7.30: Volumen almacenado en los embalses de cabecera.

Excedente económico neto

Los valores anuales del excedente (o beneficio) económico neto total del SRH se ven en la Figura 7.31.

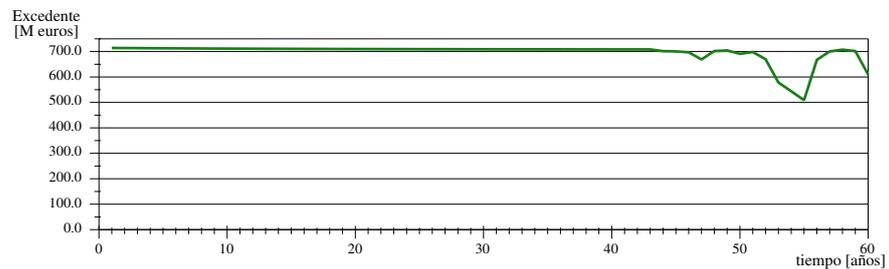


Figura 7.31: Excedente (beneficio) económico neto total (anual).

Los valores de excedente económico menores que el máximo alcanzable se concentran en los últimos años, que es el período de bajas aportaciones. La pérdida de excedente económico (respecto al excedente económico máximo alcanzable en un año sin restricciones) llega a alcanzar hasta un 30 % de este valor. Estas pérdidas de excedente ocurren, a excepción de los años más severos, en el sector agrícola de la parte inferior de la cuenca.

Pseudo-valor marginal del recurso

El pseudo-valor marginal del recurso (PVMR) se ha estimado siguiendo la metodología descrita en la sección 5.3.3, con un volumen diferencial $\Delta \text{Volumen} = 0,2 \text{ hm}^3$. La numeración de los nudos corresponde al esquema de la Figura 7.29.

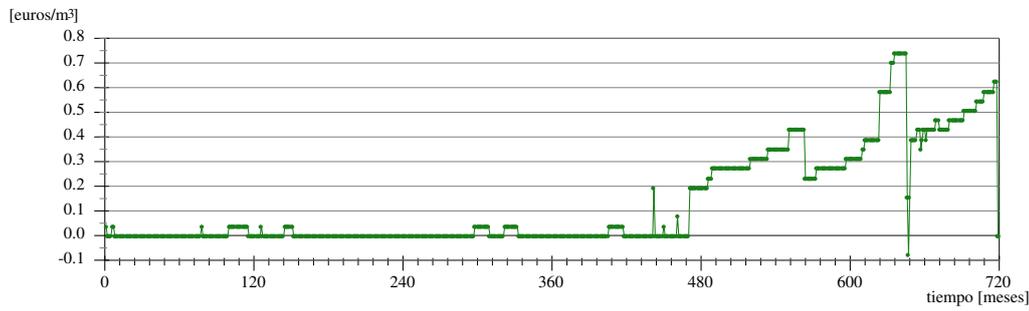


Figura 7.32: Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 2.

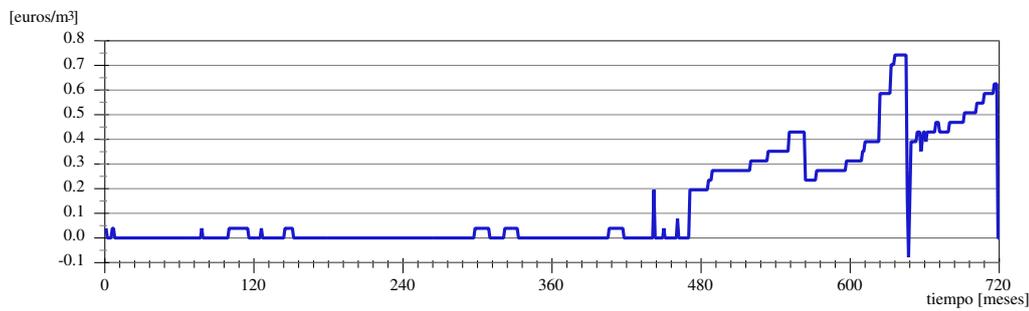


Figura 7.33: Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 14 (*Embalse de Tous*).

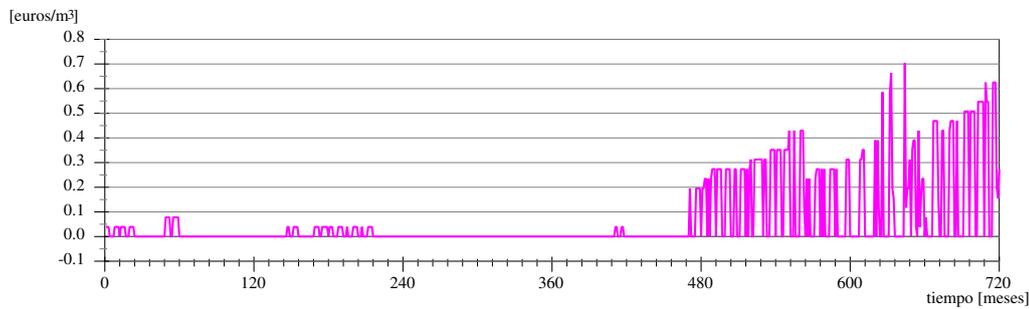


Figura 7.34: Pseudo-valor marginal del recurso en el nudo 17.

En las figuras precedentes sólo se han representado sólo algunos nudos, porque el valor de los otros coincide con éstos:

- El PVMR en el nudo 2 es también el PVMR en los nudos 3, 4, 5, 6 y 7 (Figura 7.32).
- El PVMR en el nudo 9 coincide con el valor en los nudos 10 y 11.
- A su vez, los valores anteriores son casi idénticos a los valores del tramo medio de la cuenca, en los nudos 12, 13 y 14 (Figura 7.33).
- Por último, los nudos de la cuenca baja (16 a 19 y 33 a 38) tienen todos el mismo patrón, caracterizado por fluctuaciones anuales entre cero y el PVMR en el nudo 14, debido a la incapacidad para almacenar el recurso sobrante (Figura 7.34).

Se puede decir que el SRH bajo estudio tiene una buena interconexión entre sus elementos, puesto que el PVMR es igual aguas arriba de los elementos de regulación. El nudo 14 (*Embalse de Tous*) es adecuado para ser usado como punto de referencia de todo el sistema.

Pseudo-costo marginal de restricciones de volumen mínimo

El pseudo-costo marginal de una restricción de volumen mínimo el elemento 21 (Salidas Totales al mar) se estimó siguiendo la metodología de la sección 5.3.4, también con un volumen diferencial $\Delta = 0,2 \text{ hm}^3$.

En la Figura 7.35 se han representado el pseudo-costo marginal (PCMR) de la restricción de volumen mínimo para la conducción 21 *Salidas Totales al Mar*.

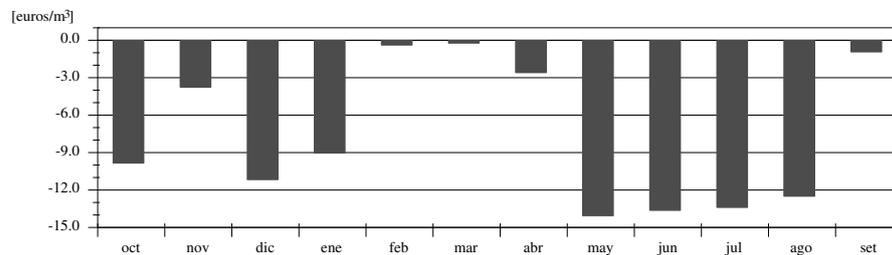


Figura 7.35: Pseudo-costo marginal del volumen mínimo mensual de las salidas al mar.

Los valores son negativos, porque como ya se mencionó en el análisis del caso de la sección 5.7.11, incrementos en el volumen mínimo provocan un descenso de los beneficios económicos. Aumentar el volumen de salidas al mar en los meses de verano es mucho más “caro” para el SRH que hacerlo en primavera.

Otros resultados

En la Figura 7.36 se representa gráficamente, para todo el período de tiempo simulado, los pares de valores: suma del volumen almacenado en los embalses de Alarcón y Contreras, y el valor del recurso en el nudo 14 (*Embalse de Tous*).

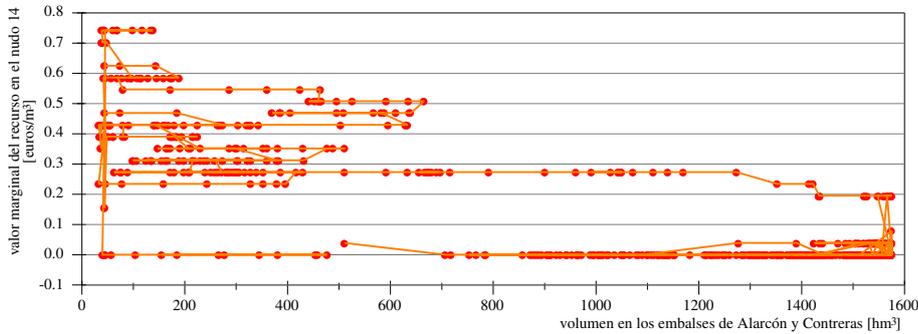


Figura 7.36: Relación *PVMR*-volumen almacenado.

Esta Figura 7.36 es bastante similar en su forma a las Figuras 4.31 y 4.32 presentadas anteriormente; sólo que ahora no existe la “regularidad” total que mostraban aquellas (los escalones de precio están nítidamente y perfectamente definidos), merced a que representan resultados de un proceso de optimización.

Se observa una mayor dispersión del valor marginal del recurso correspondiente a un volumen almacenado bajo, tal como se presentó en el caso de ejemplo de la sección 5.7.14 (CasoP1eva).

En este análisis se esperaba encontrar una relación simple que vinculara estas dos variables. En contra de lo esperado esta relación simple no existe, debido al efecto de la regulación natural y artificial que hay en la cuenca, que estabiliza el pseudo-valor marginal del recurso aunque varíe el volumen embalsado.

7.4.3. Nuevas hipótesis

A partir del caso inicial, se estudiaron 4 cambios hipotéticos:

- Imponer un volumen mínimo de salidas al mar.
- Disminuir los bombeos del acuífero Mancha Oriental para el uso Zona Albacete.
- Disminuir la prioridad de los usos agrícolas de riego de arroz.
- Eliminar los indicadores de restricción o de alarma.

Volumen mínimo en la desembocadura

La imposición de un volumen mínimo en la desembocadura del río tiene importantes efectos beneficiosos en usos ambientales, estéticos y deportivos; estos beneficios no se han valorado con una función económica, pero existen. Por ello ha sido motivo de reclamo reiterado de la ciudadanía y de las organizaciones ecologistas. Se busca cuantificar los perjuicios a los usos ya establecidos, y determinar qué elementos los sufrirán con mayor intensidad.

El valor de caudal ecológico para un tramo de río debería obtenerse de estudios específicos que consideren conjuntamente la calidad del agua, las especies que habitan, las condiciones de ribera, etc. Pero aún sin contar con un estudio de este tipo, es evidente que a mayor volumen circulante los usos anteriores se verán favorecidos.

Para determinar el patrón mensual de volumen mínimo a usar en el modelo de simulación se siguió este procedimiento:

1. Se sumaron todas las aportaciones del sistema.
2. Se calcularon distintos estadísticos mensuales para adoptar un patrón de variabilidad mensual del volumen mínimo. Los valores del promedio, del percentil del 50 % y del percentil del 25 % resultaron muy similares, por lo que se adoptó el promedio.
3. Se adoptó el volumen correspondiente a un caudal de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ para el mes con menos aportaciones (agosto), y a partir de este mes se determinó el valor de los otros meses utilizando el patrón adoptado en el punto anterior.

La Figura 7.37 muestra los valores de volumen mínimo obtenidos e introducidos en el modelo de simulación.

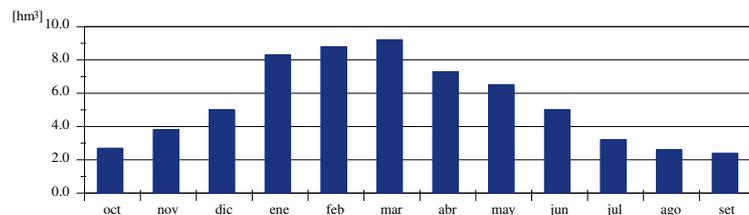


Figura 7.37: Volumen mínimo impuesto a las salidas al mar.

La diferencia entre el excedente económico en el caso inicial y el obtenido luego de imponer el volumen mínimo se ve en la Figura 7.38. Allí se ve que las pérdidas de excedente (respecto al caso sin V_{min}) se concentran en los últimos años, que son los años más secos. Y los usos perjudicados son casi exclusivamente los usos agrícolas, permaneciendo el uso urbano casi inalterado.

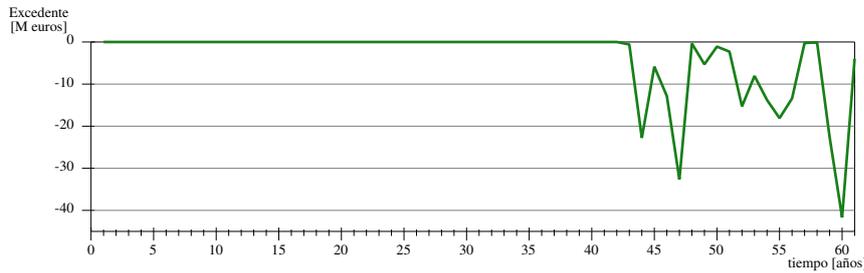


Figura 7.38: Diferencia del excedente económico del caso inicial y del caso con V_{min} en la desembocadura.

Disminución de los bombeos en Albacete

Si se hace la hipótesis de reducir las extracciones de la zona de Albacete a $125 \text{ hm}^3/\text{año}$ (aproximadamente $1/3$ de las extracciones iniciales). Esta reducción se justifica en los resultados del modelo de optimización (véase la sección 7.5.3), que indica que de no mediar subsidios (PAC), la extracción del acuífero quedarían reducidas a este valor.

La Figura 7.39 muestra los resultados, en los que se ve que en los años normales aumenta el excedente. Esto se debe a que sin los efectos distorsivos (o distorsionantes) de los subsidios, los niveles de extracciones actuales son deficitarios.

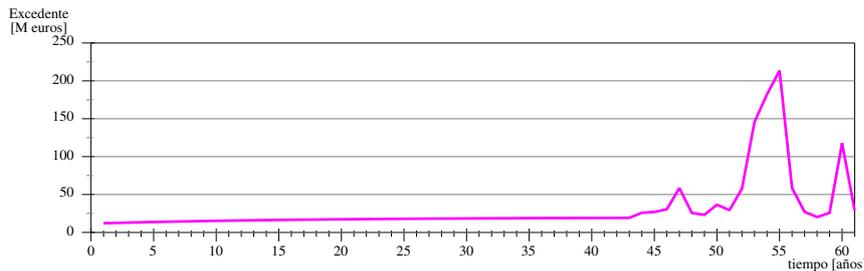


Figura 7.39: Diferencia del excedente económico del caso inicial y del caso con el volumen del uso 13 reducido.

También se aprecia que en épocas que antes eran de escasez, ahora se puede abastecer sin problemas a los restantes usos, con lo que los perjuicios evitados se vuelven muy importantes. Evidentemente se produce una recuperación paulatina del volumen almacenado en el acuífero *Mancha Oriental*, que recupera un 50% del volumen perdido respecto a las condiciones naturales, lo que secundariamente provoca una disminución de las detracciones del sistema superficial por la conexión entre ambos.

Disminuir la prioridad del riego de arroz

Si se hace la hipótesis de disminuir la prioridad de los usos agrícolas destinados al riego del arroz, considerando que la disposición a pagar para este uso es sensiblemente inferior a la disposición a pagar para riego de cítricos o huerta.

Bajo esta hipótesis, sorprendentemente no hubo cambios detectables; porque antes de que actúen en el reparto de agua las prioridades entran en acción los indicadores de restricción que cortan en una proporción importante los suministros a los usos. Esto indica que la calibración del modelo del Júcar se ha hecho de una forma muy determinista o rígida, probablemente porque los indicadores de restricción son excesivamente severos. Y por ello la gestión queda totalmente condicionada por los indicadores de restricciones.

En el Cuadro 7.19 se presentan las características de los 6 indicadores de restricción que hay en el modelo del SRH del Júcar.

Nro.	Nombre	Embalses	Vol. activo ⁷	Vol. inactivo	Rest. Máx.
1	ActAlarc	Alarcón	263-1000	0-263	1,00
2	RestACTbaja	Alarcón + Contreras + Tous	0-263	263-1000	0,25
3	ActACT	Alarcón + Contreras + Tous	263-1000	0-263	1,00
4	RestACTtrad	Alarcón + Contreras + Tous	0-263	263-1000	1,00
5	ResACTresto	Alarcón + Contreras + Tous	0-263	263-1000	0,30
6	AbstAlbacete	Alarcón	0-50	50-1000	1,00

Cuadro 7.19: Características de los indicadores de restricción.

Los indicadores 1 y 3 actúan sobre conducciones, cerrando el paso cuando los embalses tienen mucha agua. Los restantes actúan de la forma convencional, restringiendo el suministro cuando los embalses tienen poco almacenamiento. De éstos últimos el indicador 6 actúa muy rara vez, porque tiene el volumen de activación más bajo, y por eso no es demasiado importante. De los otros tres indicadores de restricción convencionales (que se aplican a los usos agrícolas), el más restrictivo es el 4 que actúa en la cuenca baja (Sueca, Cullera y Cuatro Pueblos), mientras que el 2 y el 5 restringen de forma similar el suministro normal.

La Figura 7.40 muestra la evolución temporal de los 3 indicadores de restricción que afectan a los usos agrícolas.

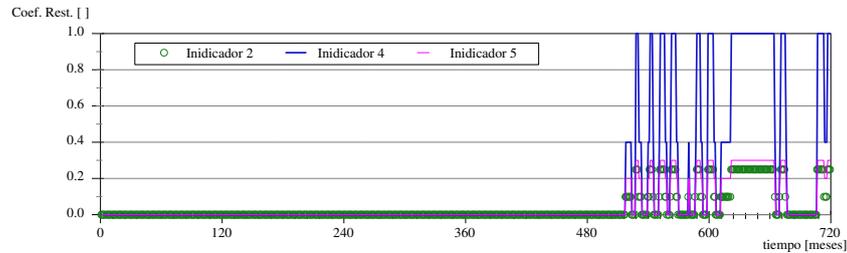


Figura 7.40: Indicadores de restricción de usos agrícolas.

⁷Volumen aproximado. Si el volumen depende del mes considerado se presenta el correspondiente a julio.

Es interesante observar en la figura anterior que los indicadores comienzan a restringir el suministro en el mes 520, mientras que en la Figura 7.33 el pseudo-valor marginal del recurso comienza a ser distinto de cero en el mes 470, que es el mes en que comienza el brusco descenso del almacenamiento (Figura 7.30). Esto es lógico puesto que una unidad adicional puede ser almacenada para mitigar el corte de suministro 50 meses después.

La Figura 7.41 muestra la relación entre la suma del almacenamiento en los tres embalses más importantes del sistema (Alarcón, Contreras y Tous) y el coeficiente de restricción para el indicador 5 (ResACTresto).

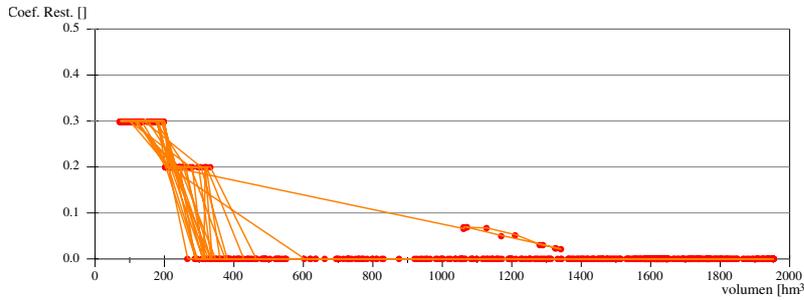


Figura 7.41: Relación entre el coeficiente de restricción y el volumen almacenado.

Eliminar los indicadores de restricción

Si se hace la hipótesis de eliminar los indicadores de alarma que actúan en el sentido tradicional, el almacenamiento en los embalses cambia muchísimo respecto al caso inicial. La comparación del pseudo-valor marginal del recurso del caso inicial con el obtenido aquí se representa en la Figura 7.42.

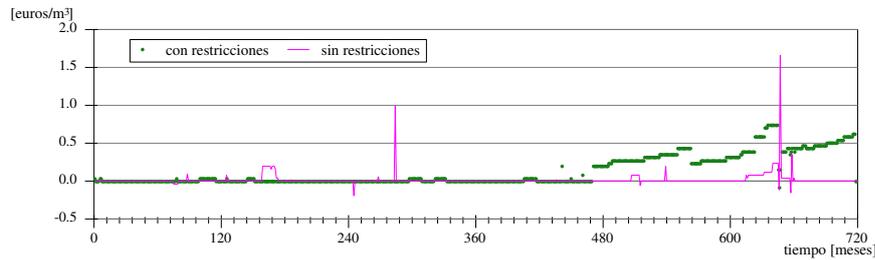


Figura 7.42: Comparación del pseudo-valor marginal del recurso.

Se puede observar que sin indicadores de restricción el pseudo-valor marginal tiene picos más agudos, pero también más esporádicos. La gran diferencia entre ambas series sugiere nuevamente que las restricciones aplicadas son excesivas.

Una interesante aplicación de MEvalGes sería, mediante un procedimiento de “prueba y error”, determinar los indicadores de restricción que minimizan la pérdida de excedente.

7.5. Aplicación de EcoGes

7.5.1. Datos utilizados

Modelo del sistema de recursos hídricos

A partir del esquema de simulación (Figura 7.29) se han realizado unas pocas simplificaciones para disminuir la complejidad del modelo en aspectos que resultan secundarios. Estas simplificaciones son:

1. El acuífero Mancha Oriental se conecta con el sistema superficial en un nudo, en vez de en una conducción. El tipo de acuífero pasa de bicelular a unicelular, conservando solamente la celda de respuesta lenta.
2. Las cuatro aportaciones de la zona inferior se agruparon en una sola.
3. No se modela la componente del acuífero de la Plana Sur entrante a la Albufera ni las aportaciones superficiales a éste cuerpo de agua, por no ser relevante para la finalidad de este trabajo.
4. No se permite el bombeo complementario (mediante los pozos de sequía) a los usos agrícolas de Acequia Real.
5. Se redujeron la cantidad de conducciones que representan al río en la zona baja de la cuenca.
6. Los usos que representaban ampliaciones posibles en el futuro se eliminaron para ejecutar más rápido el programa.

Las simplificaciones más arriesgadas son la número 1 y la número 4.

Otras simplificaciones obedecen a limitaciones propias del programa de optimización con respecto a las capacidades del programa de simulación:

1. No se pueden incluir las centrales hidroeléctricas.
2. Los embalses no tienen pérdidas por filtraciones.
3. No existen conducciones que intercambien flujo con los acuíferos a lo largo del recorrido, sino que los intercambios de agua entre el sistema superficial y el subterráneo ocurren en los nudos.
4. Los usos sólo pueden tener una toma, de forma que las tomas múltiples se han sumado.

El esquema finalmente adoptado se muestra en la Figura 7.43.

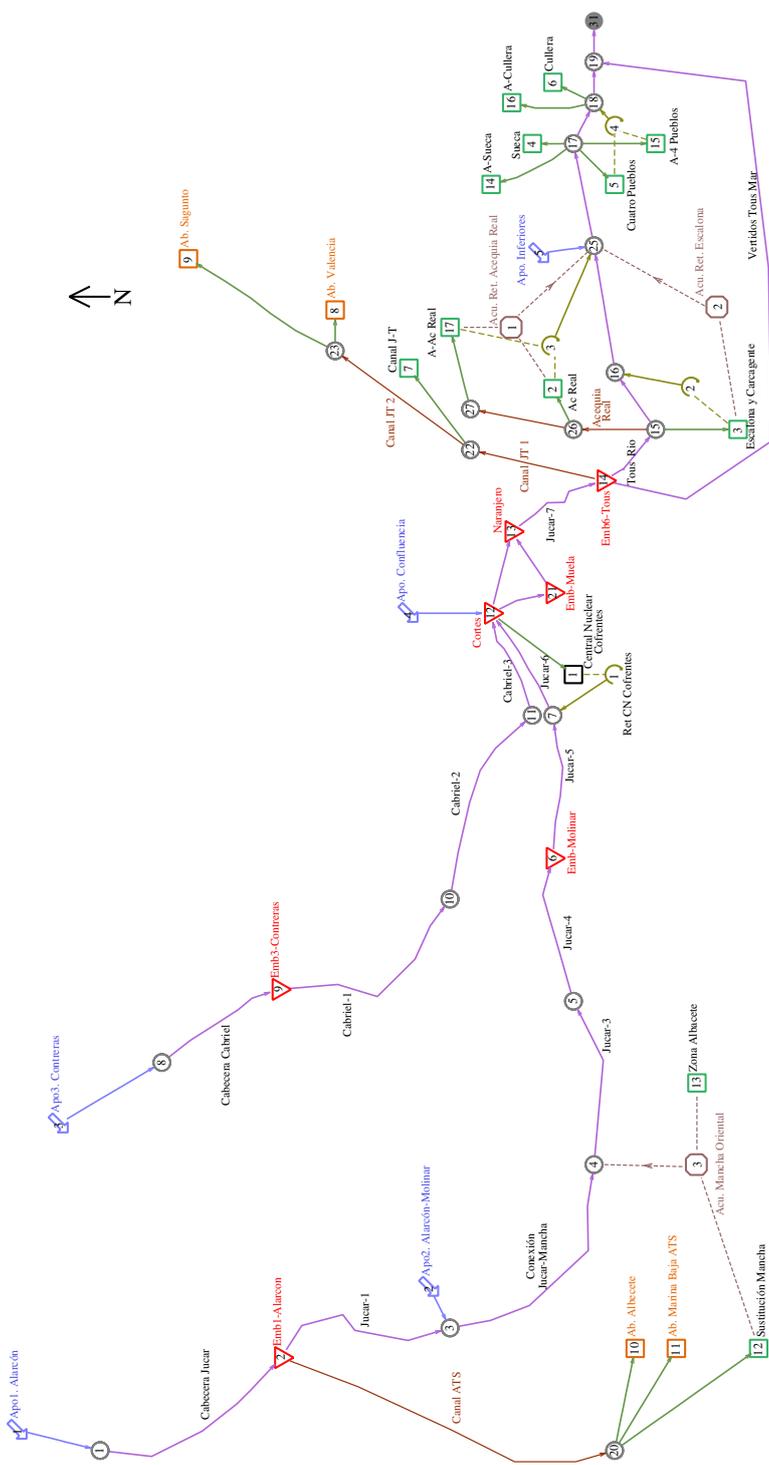


Figura 7.43: Esquema del sistema Júcar para optimización.

7.5.2. Datos económicos

Las funciones económicas utilizadas para los usos agrícola, industrial y urbano se obtienen desagregando las funciones anuales obtenidas en la sección 7.3 (Figuras 7.27 y 7.28).

Al realizar esta desagregación, se aprecia la ventaja del uso de funciones económicas lineales, puesto que en este caso simplemente hay que desplazar el punto de valor nulo de la función económica del valor correspondiente al volumen anual al valor correspondiente al volumen mensual, tal como muestra la Figura 7.44.

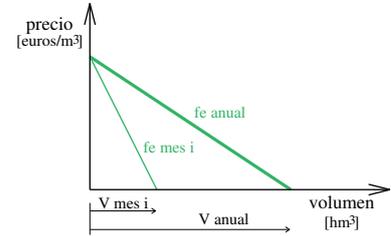


Figura 7.44: Desagregación mensual de la función económica anual.

Así se consigue que la proporción $V_{mes\ i}/V_{anual}$ sea constante para todos los precios. Esto implica que si no se puede cubrir el suministro máximo, se reduce el suministro en todos los meses en la misma proporción.

Como ya se mencionó en la sección 3.3.2, para el uso agrícola no es del todo correcta la desagregación mensual de la función económica (o curva de demanda anual). Pero conociendo este defecto, las funciones económicas mensuales son necesarias, puesto que son ellas las que determinan la asignación del recurso.

Para los usos agrícolas de riego de cítricos, frutales y hortalizas que tienen una función económica no lineal, la desagregación mensual es más trabajosa, porque hubo que hacer coincidir tres condiciones: el valor correspondiente a volumen nulo, el valor correspondiente a precio nulo, y la pendiente de la curva próxima al precio nulo. Un ejemplo de esta desagregación puede verse en la Figura 7.45.

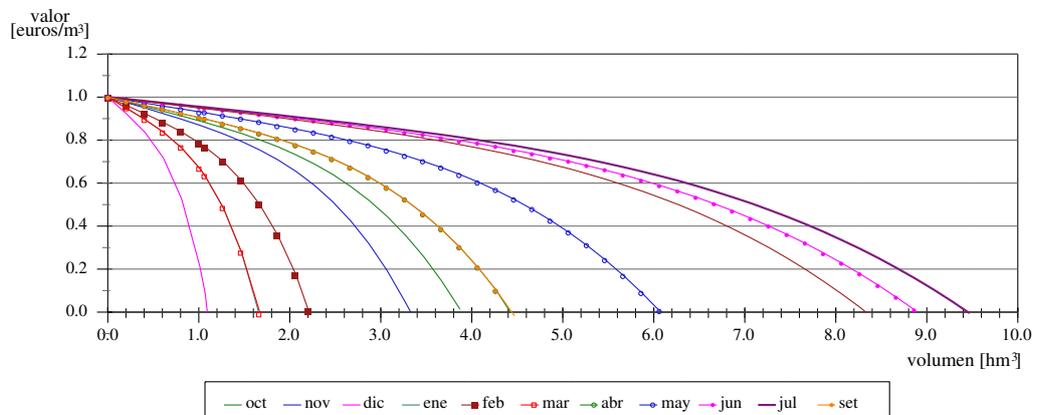


Figura 7.45: Curvas de demanda mensual para el uso Escalona y Carcagente.

Uso ambiental

Las funciones económicas empleadas para uso ambiental son levemente distintas de las utilizadas para el mismo uso con el programa MEvalGes. Se ha preferido utilizar las funciones quebradas que se muestran en la Figura 7.46. Observese que los valores máximos son similares a los de las funciones económicas del cultivo de arroz.

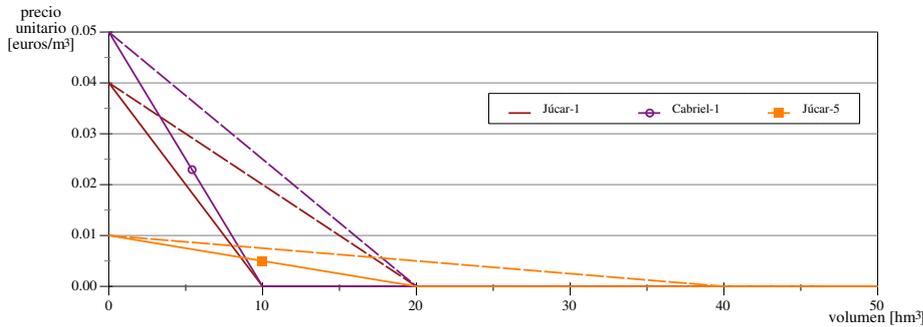


Figura 7.46: Curvas de demanda mensuales de los usos ambientales en optimización.

Las curvas de líneas llenas corresponden a los meses normales, mientras que las de líneas punteadas corresponden a los meses de mayor caudal circulante en régimen natural, que para cada elemento son los siguientes:

- Júcar-1: enero, febrero, marzo y abril.
- Cabriel-1: febrero y marzo.
- Júcar-5: enero, febrero, marzo.

El uso de esta función quebrada consigue que la valoración del uso ambiental no afecte a los usos de aguas arriba siempre que se supere el volumen correspondiente al punto de quiebre, cosa que no sucedía con las otras curvas de demanda continuas (Figura 7.25).

Funciones económicas necesarias

Al optimizar el periodo total de tiempo “a trozos” se hace necesario introducir algún mecanismo que evite la situación de indiferencia entre guardar el agua en los embalses o desaguarlas al finalizar cada “trozo”. Esto se consigue añadiendo una función económica que penalice (en pequeña cuantía) las salidas al mar, y/o una función económica que premie el almacenamiento en los embalses.

La transcripción del archivo económico se encuentra en el Apéndice D.

7.5.3. Resultados

Asignación a los distintos usos

De los muchos resultados obtenidos, a continuación se presentan los de mayor interés.

La Figura 7.47 muestra la evolución del almacenamiento superficial en los dos embalses más importantes de la cuenca.

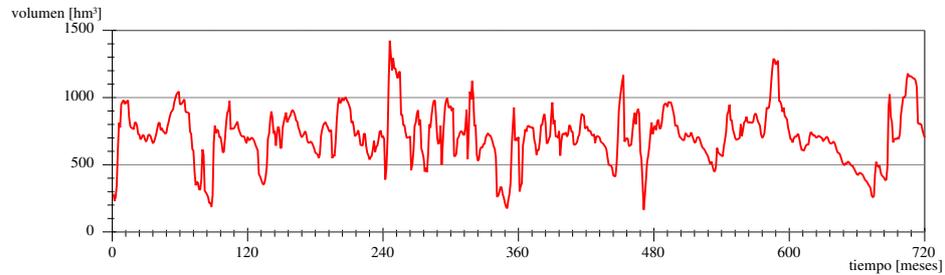


Figura 7.47: Suma del volumen almacenado en los embalses de Alarcón y Contreras.

Zona aguas abajo de Tous

La Figura 7.48 muestra la asignación para tres usos.

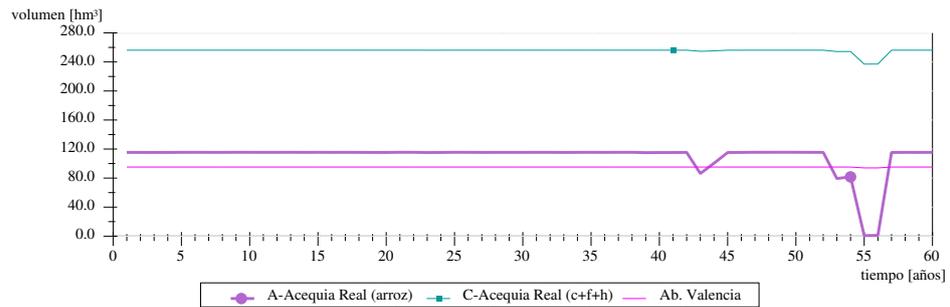


Figura 7.48: Asignación anual a distintos usos.

De los tres usos representados, puede verse que mientras el uso más valorado (Ab. Valencia) casi no sufre recortes de suministro, los otros usos son afectados por los episodios de escasez. Y el uso menos valioso (A-Acequia Real, cultivo de arroz) es afectado con mayor intensidad que el cultivo de cítricos, frutales y huerta (C-Acequia Real).

La Figura 7.49 muestra el total anual asignado al cultivo de arroz (usos 14, 15, 16, y 17).

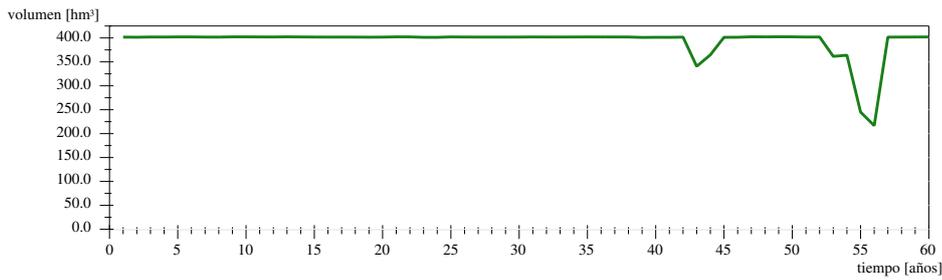


Figura 7.49: Asignación anual al total de cultivos de arroz.

En los años de abundancia se asigna un volumen igual al actualmente asignado, pero en los últimos 20 años hay numerosos fallos en la provisión de esta cantidad. Esto indica la conveniencia de reducir el volumen destinado a este cultivo, por ejemplo a un valor aproximado de 3/4 partes del volumen asignado actualmente, para que la situación sea más conveniente económicamente para todo el sistema de recursos hídricos.

La Figura 7.50 muestra como las salidas del acuífero (y lo que es similar, el volumen almacenado) también siguen el mismo patrón de épocas de escasez y de abundancia que el almacenamiento superficial, pero más atenuado.

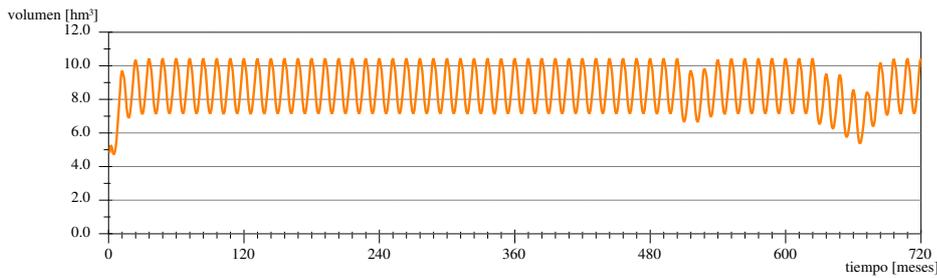


Figura 7.50: Evolución de la salida del acuífero Acequia Real al río Júcar.

La regularidad de la salida no debe sorprender, puesto que todos los acuíferos se modelan por superposición. Así, las salidas efectivas se obtienen sumando a las salidas de la figura anterior las salidas del acuífero en régimen natural, que contienen los efectos irregulares de recarga por precipitaciones, etc.

Zona de Albacete

La Figura 7.51 muestra la evolución temporal de los bombeos para el uso 13 (Zona Albacete). En los últimos años la extracción óptima está en torno a 170 hm³ (recordar que el valor actualmente extraído es de 445 hm³ al año).

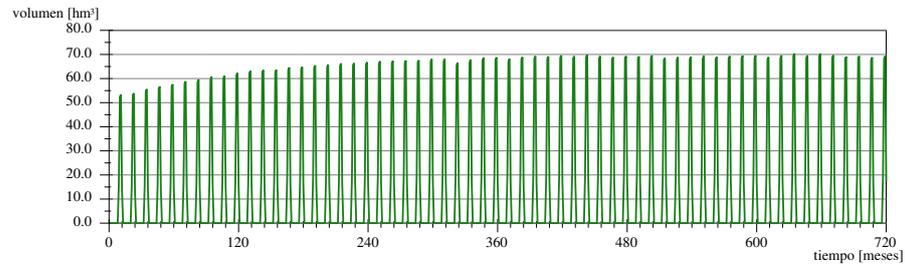


Figura 7.51: Bombeos del acuífero Mancha Oriental para el uso 13 (*Zona Albacete*).

La Figura 7.52 muestra valores referidos al uso 12 (*Sustitución Mancha*). Como este uso puede abastecerse de agua superficial o de agua subterránea, se muestra el suministro total (línea fina) y también el volumen bombeado del acuífero de Mancha Oriental (línea gruesa).

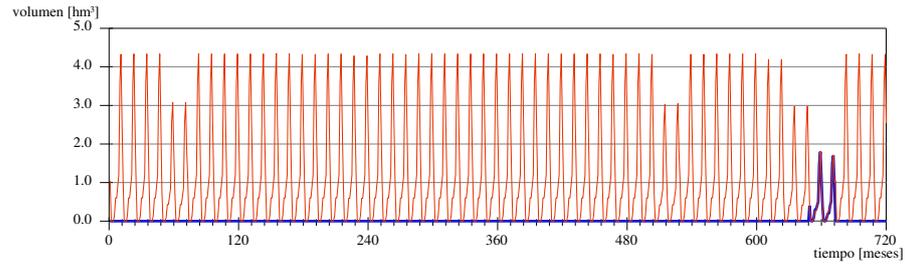


Figura 7.52: Suministro al uso 12 *Sustitución Mancha* y bombeos desde el acuífero.

Se aprecia que hay varias épocas de menor suministro, pero sólo resulta conveniente bombear y reemplazar el suministro superficial en la época más seca (línea gruesa azul).

Podría pensarse que el costo de esos bombeos, corresponde exclusivamente a dicho uso, pero esto no es así, porque la gestión óptima es óptima para todo el SRH considerado conjuntamente. Asociados a estos bombeos hay beneficios en los usos de aguas abajo. El valor que corresponde exclusivamente al uso *Sustitución Mancha* es la diferencia entre el costo de extracción (aproximadamente constante e igual a $0,05 \text{ €/m}^3$) y el valor marginal del recurso en el nudo 2. En los años 1995 y 1996 el *vmr* es superior al costo de bombeo.

La Figura 7.53 muestra la evolución del volumen del acuífero de Mancha Oriental.

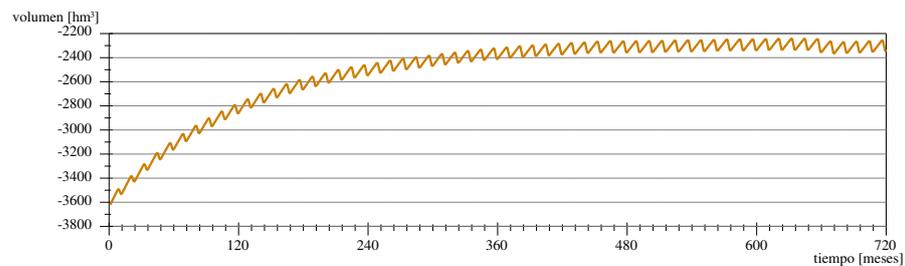


Figura 7.53: Evolución del acuífero Mancha Oriental.

El acuífero recupera volumen merced a las filtraciones que recibe desde el río Júcar y a la reducción de los bombeos resultante de la optimización económica. Es interesante apreciar cómo se alcanza un volumen de equilibrio (correspondiente a una profundidad de 61 m), en el cual es económicamente eficiente el aprovechamiento de sus aguas. En esta condición de equilibrio el acuífero siempre es ganador en su conexión con el sistema superficial.

Valor marginal del recurso en los nudos

El valor marginal del recurso en los nudos del SRH obtenido dependerá de la cantidad de periodos que se optimicen conjuntamente. Esto puede verse en las Figuras 7.54 a 7.57.

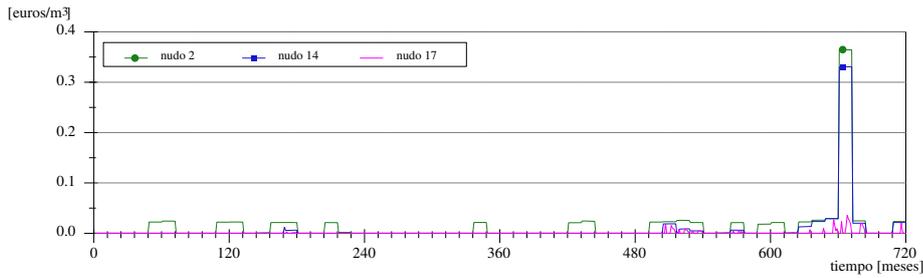


Figura 7.54: Valor marginal en los nudos, optimización de a 1 año.

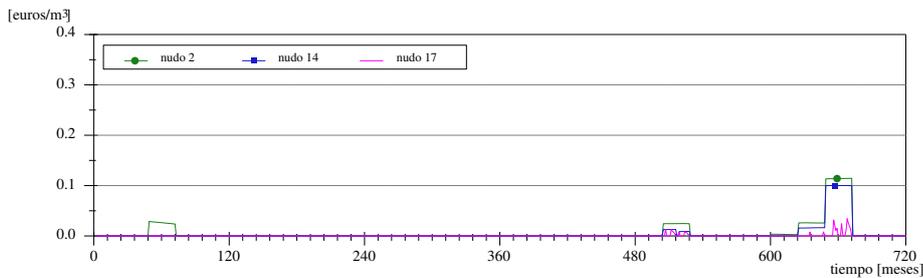


Figura 7.55: Valor marginal en los nudos, optimización de a 2 años (adoptado).

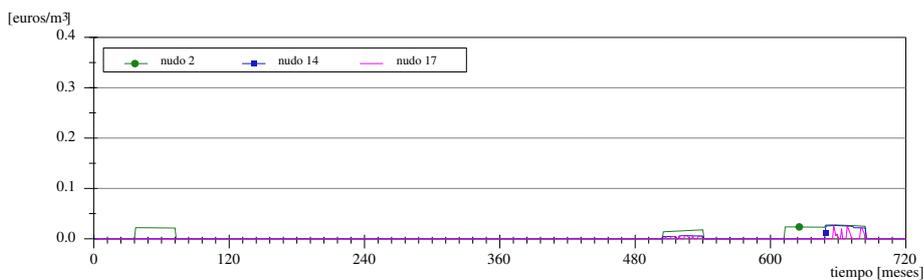


Figura 7.56: Valor marginal en los nudos, optimización de a 3 años.

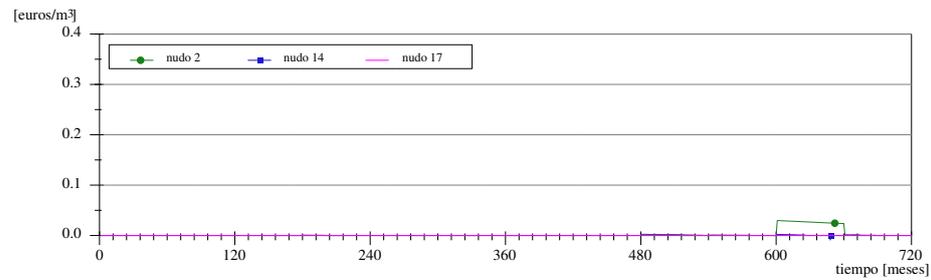


Figura 7.57: Valor marginal en los nudos, optimización de a 5 años.

Los nudos del SRH se pueden agrupar en 4 clases, cada clase con idénticos valores marginales (por esto en las Figuras 7.54 a 7.57 anteriores se ha representado un nudo de cada clase relevante). Cada clase comprende los siguientes nudos:

- nudos 2 y 20.
- nudo 9.
- nudos 3, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 22, 23, 26 y 27.
- nudos 16, 17, 18, 19 y 25.

Interpretación de resultados

- La conclusión más evidente es que con los supuestos asumidos en la modelación y realizando una gestión económicamente óptima, la escasez en esta cuenca es un acontecimiento esporádico.
- Otro resultado de interés, en cierta forma sorprendente, es que no hay estacionalidad en el valor marginal del recurso. La gran capacidad de regulación estabiliza los ciclos anuales; no así los hiperanuales asociados a ciclos húmedos y secos que sí presentan distinto valor marginal del recurso.
- El $vmr_{17} \leq vmr_{14}$ debido al efecto beneficioso que tiene sobre la disponibilidad del recurso hídrico los retornos, las salidas de los acuíferos y la aportación *Apo. Inferiores*.
- Por otra parte, $vmr_2 > vmr_{14}$ cuando el volumen circulante por *Júcar-1* y *Júcar-5* es inferior al punto de quiebre de las respectivas funciones económicas de uso ambiental (Figura 7.46).

Tamaño a optimizar conjuntamente

Evidentemente, cuanto mayor es el período de optimización conjunta se consiguen menores valores marginales, puesto que es posible una mejor redistribución del recurso y un mejor aprovechamiento de la capacidad de almacenamiento.

La elección del periodo a optimizar conjuntamente dependerá de la forma de gestionar el SRH, y de la regulación que se pueda hacer del recurso. Hay que tener presente que con un periodo de optimización de 5 años puede darse la situación de que en el año 1 se tenga

casi llenos los embalses y aún así se restrinja el suministro en ese primer año para atender los requerimientos dentro de 4 años. Por esta razón, no se considera conveniente optimizar más de 3 años en forma conjunta, y para nuestro caso de aplicación se adopta un periodo de optimización de 2 años. De esta forma se evita en parte el problema más criticado de la optimización, que es la hipótesis de conocimiento perfecto del futuro hidrológico.

Al optimizar “a trozos” con longitud mayor a 1 año tiene importancia el punto de interrupción de cada trozo. Este efecto se puede minimizar realizando varias optimizaciones, cada una con un año inicial sucesivo, y promediando los resultados de valor marginal (o reteniendo el resultado con valores más altos, que es el más desfavorable).

En cada “trozo” optimizado conjuntamente, el programa intenta mantener el valor marginal constante y en el menor valor posible, a menos que sea imposible por alguna restricción física del sistema (como carencia de aportaciones), cosa que sucede en la Figura 7.56, en el período del mes 672 al mes 684.

Relación almacenamiento-valor marginal del recurso

La Figura 7.58 muestra la correspondencia entre el almacenamiento superficial en los principales embalses del sistema y el valor marginal del recurso en un nudo representativo (nudo 14, *Embalse de Tous*).

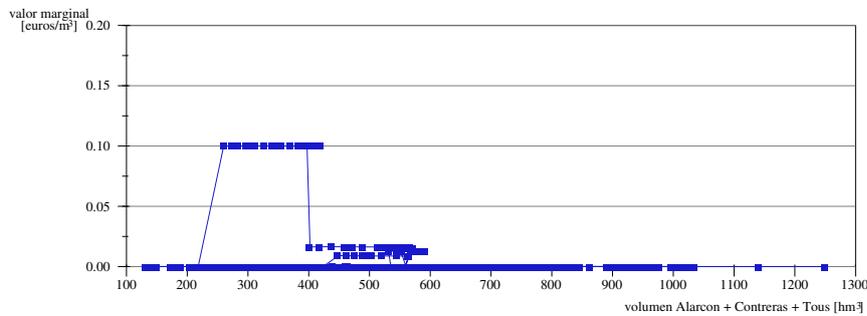


Figura 7.58: Almacenamiento superficial y *vmr* en el nudo 14 (embalse de Tous).

Para los distintos valores de volumen almacenado podemos pensar que el correspondiente valor marginal tiene una función de probabilidad. Para almacenamientos altos la varianza es pequeña, mientras que para almacenamientos bajos la varianza es grande.

Puede trazarse una envolvente de los puntos más alejados del origen Figura 7.59, que no por casualidad tiene pendiente negativa (como una curva de demanda). Esta envolvente representa el valor máximo que alcanza el agua para distintos valores de almacenamiento (para el periodo optimizado).

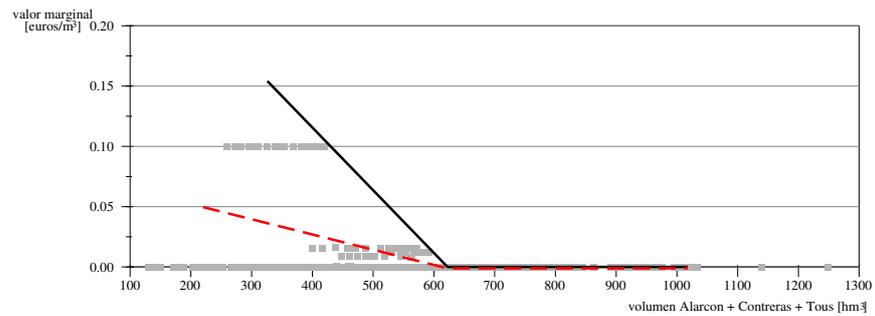


Figura 7.59: Envolvente del almacenamiento superficial y *vmr* en el nudo 14.

Si se piensa en una forma de repercutir a los usuarios el costo de escasez, el utilizar esta envolvente sería excesivo. Una opción más razonable es la línea roja a trazos de la Figura 7.59, que deja algunos puntos por encima y otros por debajo. Pero, si se adoptara tal alternativa, se estaría restringiendo el suministro (de forma preventiva) sin necesidad en las situaciones que representan los puntos inferiores a la línea, en las que el bajo volumen almacenado se recupera de forma natural.

Como sucede habitualmente, es difícil establecer criterios simples de gestión a partir de la optimización de un SRH, porque se optimiza con un conocimiento perfecto de todo lo que va a suceder. Esto permite adoptar una estrategia particular para las distintas circunstancias, cosa que cuando hay que tomar decisiones con incertidumbre no es posible. Para establecer criterios de actuación a partir de la situación actual resulta más apropiado el enfoque probabilístico como el presentado en el Caso J1, en la sección 4.6.12.

7.5.4. Análisis de sensibilidad

En esta sección se intenta responder a la pregunta ¿De qué depende el *vmr* en los nudos? ¿El cambio de qué parámetros económicos cambiaría mucho los resultados?

En los resultados iniciales, el valor del recurso en el embalse de Tous (Figura 7.55) es inferior a 0,11 €, por lo que las restricciones de suministro en cada uso serán las correspondientes a precios inferiores a este valor. Es posible hacerse una idea de los usos más afectados observando las curvas de demanda anuales de las Figuras 7.27 y 7.28, de las cuales derivan las curvas utilizadas en la optimización.

Funciones económicas del arroz

Los usos que se restringen en mayor proporción son los cultivos de arroz, seguidos de los cultivos de cítricos y huerta, y por último los usos urbanos, tal como se ve claramente en la Figura 7.48. En el episodio de máxima escasez, el suministro al uso agrícola *A-Acequia Real* es nulo.

Se ha variado la función económica del uso agrícola en el arroz, cambiando el valor correspondiente a volumen nulo y manteniendo el volumen máximo (correspondiente a valor nulo). Los valores de los parámetros empleados y los resultados obtenidos se muestran en el Cuadro 7.20.

valor de a	$vmr_{m\grave{a}ximo}$
0,050	0,11
0,075	0,15
0,100	0,18

Cuadro 7.20: Comparación del vmr máximo en el nudo 2 con distinto valor en el riego del arroz.

Otros parámetros económicos

Los otros parámetros económicos tienen menos influencia que el anteriormente analizado:

- Los usos que siguen en orden de influencia son los usos para riego de cítricos, frutales y huerta, pero en las pruebas realizadas, el orden de magnitud de los resultados obtenidos de modificar estas funciones económicas fue de un orden de magnitud inferior a los cambios obtenidos con las funciones económicas del arroz, lo cual hace que tenga poca influencia. Además para el uso de cítricos, frutales y huerta es para el que se disponen de datos más confiables para la estimación de los parámetros dentro de los usos agrícolas.
- El uso 13 (*Zona Albacete*) tiene cierta independencia del sistema superficial, por abastecerse exclusivamente de agua subterránea. Su equilibrio de “mercado” depende del costo de extracción. Si se quisiera repercutir el valor del recurso como un costo a los usuarios, en este uso sería aceptable considerar el valor medio de las detracciones del sistema superficial en el nudo desde donde se producen (nudo 4), ya que la gran inercia del acuífero regula y protege a este uso de los picos de vmr . De esta forma se compensaría la externalidad que produce en los usos de aguas abajo en los meses de escasez. Este valor sería de $0,004 \text{ €/m}^3$ con las condiciones asumidas.
- El uso 1 (*Central Nuclear*) queda garantizado en todo momento, porque su fe en todo momento es superior al vmr en el punto de toma. Por tener una fe constante sólo admite estados binarios (todo o nada) en la asignación de cada mes.

7.5.5. Nuevas hipótesis

A continuación se desarrollan tres hipótesis de modificación en las condiciones de la optimización:

- a - Valorar el caudal vertido al mar, por su función ambiental.
- b - Permitir la expansión de la superficie de cultivo de cítricos y huerta.
- c - Penalizar los retornos agrícolas por el deterioro de calidad del agua.

Valoración del caudal vertido al mar

El caudal circulante en el tramo inferior del río tiene una función ambiental y estética importante, no sólo en el propio río sino también por el aporte de nutrientes al ecosistema marino.

Se ha valorado el volumen circulante con la siguiente función económica, igual para todos los meses: $fe_{(C-16)} = 0,30 - 0,0075 \cdot V_{(C-16)}$

Esta fe tiene la misma forma que las de la Figura 7.46, esto es, para valores superiores a los $40 \text{ hm}^3/\text{mes}$ el valor es nulo, de forma que esta fe sólo pesará en la asignación de volumen en los meses en los que no se alcanzaba este valor.

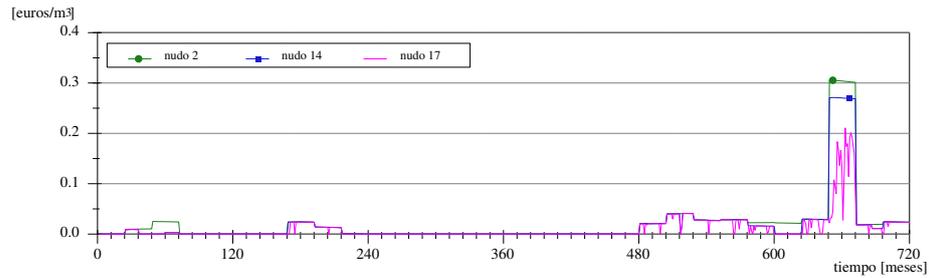


Figura 7.60: vmr en la hipótesis de uso ambiental de las salidas al mar.

Como muestra la Figura 7.60, para los últimos 20 años se obtiene un valor bastante constante del orden de $0,025 \text{ €/m}^3$.

Expansión del volumen de agua dedicado a riego de cítricos, frutales y huerta

Bajo esta hipótesis se asume que es posible expandir el uso de agua para cultivos de cítricos, frutales y huerta (aumentando la superficie de cultivo), puesto que hay incentivos económicos para aumentar este uso a largo plazo, ya sea en detrimento de otros usos o utilizando los recursos excedentes.

La función económica utilizada para los cítricos, frutales y huerta es la prolongación de la recta inicial de la curva de demanda (Figura 7.61 adjunta). Esta recta relaciona el precio del agua con el abandono de estos cultivos por falta de rentabilidad, y por lo tanto es válida también para la puesta en cultivo cuando la rentabilidad lo permite.

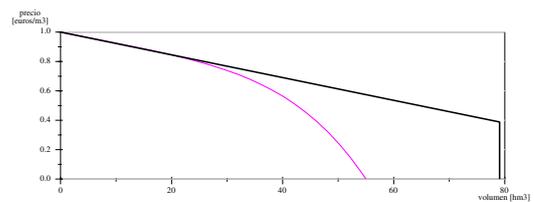


Figura 7.61: Función económica para los cítricos, a largo plazo y con expansión infinita.

El volumen anual destinado a riego de cítricos, frutales y huerta con esta modificación en los datos es de 609 hm^3 , mientras que antes era de 417 hm^3 ; lo cual conlleva el aumento de los beneficios totales. Pero la contraparte es que en los momentos de escasez, ésta afecta más severamente a todos los usos, tal cómo se ve en la Figura 7.62 (comparar con la Figura 7.55).

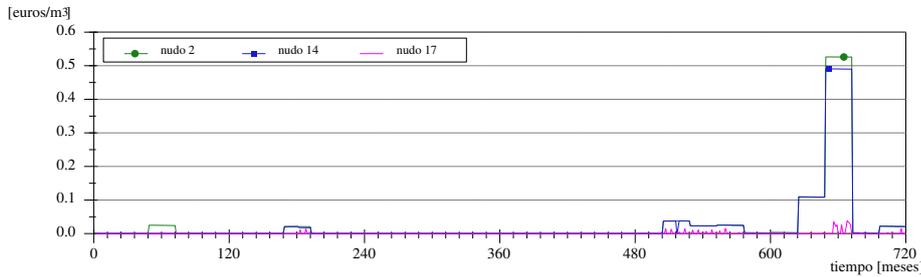


Figura 7.62: *vnr* permitiendo expansión del cultivo de cítricos (largo plazo).

Los resultados de este caso ponen en evidencia que cuanto más óptimo es el funcionamiento del sistema, tiene menos “holguras” para hacer frente a una situación no prevista, que exceda las hipótesis o condiciones de diseño. En estas condiciones el sistema está más estresado, y por lo tanto es más vulnerable [Marco, 1993]. Sin embargo no todo son desventajas, ya que esta situación reporta mayores beneficios económicos en condiciones no extremas de exigencia.

Penalización de los retornos agrícolas

Los retornos del uso agrícola presentan un deterioro de calidad del agua. Puesto que los usuarios no pagan canon de vertido están provocando una externalidad negativa a los usuarios de aguas abajo. Si se desea internalizar este efecto, aunque sólo sea de forma aproximada, se estará representando de forma más realista las relaciones económicas en el SRH.

Para ello se ha valorado el volumen de los retornos 2 (*Escalona*), 3 (*Acequia Real*) y 4 (*Cuatro Pueblos*) con esta función económica constante: $f_{e_{retorno}} = -0,01 \cdot V_{retorno}$

Debido al mecanismo de iteraciones que emplea EcoGes para ajustar los retornos (ver sección 4.6.9), si esta *fe* se introduce directamente en el retorno, no influye al momento de decidir la asignación. Por lo tanto se debe introducir de forma indirecta, reduciendo la *fe* de las demandas vinculadas al retorno de la siguiente forma: $f_{e_{dem\ nueva}} = f_{e_{dem}} - (0,01 \cdot coef. retorno_{dem})$

Lógicamente, la disminución de la *fe* de los usos tiene como consecuencia una disminución en la asignación, lo cual es más notorio en los riegos del arroz que en los de cítricos. El uso 17 (*A-Acequia Real*) pasa de recibir $115,4$ a recibir $103,8 \text{ hm}^3/\text{año}$; el uso 15 (*A-4 Pueblos*) pasa de $23,8$ a $22,3 \text{ hm}^3/\text{año}$. Este menor consumo a su vez permite una muy leve disminución del *vnr* en las épocas de escasez.

7.6. Comparación de ambos modelos y conclusiones

De la aplicación del modelo EcoGes a la cuenca del Júcar se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La escasez en la cuenca no es severa, sino más bien un evento esporádico que en el caso de la serie histórica corresponde a la sequía de los años 90. Esta circunstancia deja poco margen para obtener beneficios mediante aumentos de ofertas (trasvase) en esas circunstancias puntuales.
- La gestión actual del acuífero Mancha Oriental es claramente insostenible. Buena parte de las extracciones responden al efecto distorsivo que provocan los subsidios agrícolas de la PAC. Si estos disminuyen (o desaparecen), se solucionaría automáticamente la escasez en la zona inferior de la cuenca.
- Los usos urbanos, como era de esperar, casi no sufren disminución en sus suministros, merced a su mayor disposición de pago. Lo mismo vale para la Central Nuclear de Cofrentes.
- El agua destinada al riego del arroz tienen una rentabilidad muy baja, apoyada también por subsidios para el mantenimiento de zonas húmedas. Estos riegos serían los primeros en restringirse en condiciones de mercado, pero sus derechos y concesiones de uso evitan que esto suceda.
- Para aumentar el excedente económico obtenido del uso del agua, habría que expandir la superficie cultivada con cítricos, frutales o huerta, que no están subsidiados y que son los usos agrícolas más rentables. Esto se haría naturalmente a expensas del cultivo de arroz y de cereales.
- La mejora en las condiciones ambientales en el tramo inferior del río Júcar incrementaría algo, no excesivamente, la escasez en el SRH. Los usos más afectados serían nuevamente los riegos menos rentables.

De la aplicación del modelo MEValGes a la cuenca del Júcar se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Considerando la asignación actual que reproduce el modelo de simulación, se puede decir que los episodios de escasez son persistentes en los últimos 20 años.
- Los indicadores de restricción son los causantes de que los eventos de escasez se presenten con demasiada antelación y sean bastante severos. Esto hace pensar que no hay concordancia entre los datos de la disposición a pagar (que muestra para el cultivo de cítricos bastante inelasticidad), con el porcentaje de restricción que se aplica a estos mismos usos en el modelo de simulación.

Como ya se ha dicho, un ejercicio interesante sería, mediante un procedimiento de “prueba y error”, encontrar unos indicadores menos perjudiciales para la economía de los usos.

- El pseudo-valor marginal del recurso (obtenido con MEvalGes) es siempre mayor que el valor marginal del recurso (obtenido con EvalGes). Esto es coherente con el hecho de que el modelo de simulación no asigna el agua todo lo eficientemente (en el sentido económico) que lo hace el modelo de optimización. Se reproduce la “forma” o evolución del valor, pero con distinta magnitud.

Se aprecia que, si bien en las condiciones actuales de gestión hay una cierta escasez, esta puede resolverse *dentro de la propia cuenca* sin costes excesivos, si se cambiaran las prioridades de ciertos usos agrícolas, o se interviniera en los bombeos de la zona de Albacete, o se penalizaran económicamente los retornos agrícolas contaminantes, o se permitiera un mecanismo de mercado entre los usos. Este último mecanismo sería sustancialmente más barato que traer agua de tierras lejanas.

Capítulo 8: Conclusiones

8.1. Recapitulación del trabajo presentado

Para esta tesis doctoral se han desarrollado, puesto a punto y utilizado tres programas informáticos para realizar análisis económico a escala de cuenca.

El módulo de optimización **EcoGes** asigna el recurso escaso entre los usos de la cuenca, maximizando el excedente total en el periodo de análisis. Al permitir incorporar los flujos de y hacia los acuíferos como variables de decisión, permite tratar de igual forma el agua proveniente del sistema superficial o del subterráneo. La asignación se basa en el funcionamiento de un mecanismo de mercado perfecto; que a pesar de ser una premisa alejada de las condiciones actuales, resulta muy útil para obtener el máximo excedente o beneficio económico y el mínimo valor marginal del recurso en el SRH, que constituyen útiles puntos extremos de referencia del análisis económico. Como el mecanismo de mercado es simple, la interpretación de los resultados es conceptualmente clara.

El módulo de post-evaluación económica de la gestión **EvalGes**, evalúa el rendimiento económico del resultado de una asignación de la gestión del SRH, obtenida del uso de un modelo de simulación basado en prioridades. El modelo de simulación ha de estar adecuadamente validado de forma que pueda reproducir los criterios actuales de gestión. De todas formas esta evaluación resulta bastante influenciada por la forma de la función económica cerca del origen, la cual presenta en esta zona grandes incertidumbres. A pesar de ello, el uso de este programa permite comparar el rendimiento económico del sistema bajo distintos escenarios hidrológicos; y comparar alternativas de actuación en infraestructuras y reglas de gestión.

El módulo de múltiples evaluaciones de la gestión **MEvalGes**, utiliza el módulo EvalGes antes mencionado. Mediante la metodología del cambio diferencial desarrollada, se obtienen indicadores similares en su concepción a los obtenidos con el modelo de optimización, pero basados en la gestión actual. Con esta metodología se compensan los efectos de la incertidumbre en los valores bajos de la fe , de forma que los resultados son más confiables. La interpretación de los indicadores no es tan clara (puede estar ensombrecida por el modelo de simulación), pero resultan mucho más aplicables en la práctica porque respeta la forma actual de gestión del agua en la cuenca.

También se ha dedicado un esfuerzo importante a la construcción de una interfaz de ventanas (programa **Gestal**), de forma que todos los programas se constituyan en un ver-

dadero SSD, que permita que terceras personas puedan usar fácilmente las herramientas desarrolladas.

La principal virtud de todos los modelos, es que pertenecen a la categoría de modelos genéricos o generales, de forma que se pueden aplicarse a casi cualquier cuenca, y sistematizar los análisis realizados. Prueba de ello son los más de 30 casos simples que se han resuelto y presentado para comprender las relaciones cualitativas entre las variables hidrológicas y de gestión con los indicadores económicos.

Entre estos casos simples merece destacarse (para cada programa) el caso de enfoque probabilístico, usando múltiples series hidrológicas a partir de un estado inicial determinado. Este enfoque permite disminuir el peso de la hipótesis de conocimiento perfecto que se realiza sobre las aportaciones futuras; y obtener una función de distribución de probabilidad sintética del valor marginal del recurso o del valor marginal de otros indicadores. Y de esta forma estudiar el rendimiento económico del SRH no sólo para la hidrología pasada sino para posibles situaciones futuras.

Los dos casos de aplicación presentados son casos reales:

- El caso del PHN tuvo como complejidad la existencia de múltiples mínimos locales, pero la facilidad de que las funciones económicas se asumieron como datos, suministrados por el propio PHN. Ajeno a la polémica desatada en torno a este plan, el ejemplo viene a mostrar la utilidad que tienen actualmente las herramientas presentadas en la toma de decisiones relacionadas con las obras hidráulicas.
- El caso de la cuenca del Júcar fue mucho más complejo porque requirió obtener (investigar, relacionar datos y asumir valores) las funciones económicas. Esta tarea es evidentemente perfectible a medida que se mejoren los datos disponibles. La obtención del valor marginal del recurso y del valor marginal de las restricciones ambientales de cantidad forma parte del estudio económico piloto en España para el cumplimiento de la Directiva Marco del Agua y es, por lo tanto, pionero en su ámbito.

8.2. Conclusiones

Las conclusiones particulares de cada caso de aplicación se encuentran al final de los respectivos capítulos. Además pueden mencionarse una serie de conclusiones de carácter general referidas a la modelación hidro-económica:

- El valor marginal del agua en la cuenca es un indicador económico de gran utilidad; que resulta más influenciado por los usos de menos valiosos o elásticos que por los más valiosos. Por ello resulta primordial mejorar el conocimiento acerca de la disposición a pagar de los regantes.
- La utilidad de estos modelos para detectar situaciones en los que las políticas públicas en distintos áreas producen efectos encontrados (como la PAC y la DMA

en el caso de aplicación de la cuenca del Júcar). En estos casos es más lógico intentar solucionar la causa que mitigar las consecuencias.

- Las grandes posibilidades de mejora de beneficios (sobre todo públicos) que se pueden obtener a partir de racionalizar económicamente la gestión del agua e internalizando las externalidades de los usos, vía recuperación de costos.

8.3. Contribuciones

Las contribuciones originales más destacables de este trabajo son:

- La creación de un modelo genérico de optimización económica EcoGes, que incluye la modelación de acuíferos y otras mejoras importantes respecto a los modelos previos.
- La metodología de evaluaciones múltiples con un cambio diferencial en las condiciones, implementada en el modelo MEvalGes, es conceptualmente simple, computacionalmente sencilla, pero ha dado muy buenos resultados al ser aplicada.
- La propuesta de curvas de demandas para los distintos usos del agua en la cuenca del Júcar, aunque hecha asumiendo ciertos valores desconocidos, resulta una primera aproximación limitada pero válida para el análisis económico a escala de cuenca.
- La estimación del valor del recurso y del costo marginal de las restricciones de cantidad en la cuenca del Júcar, cuenca piloto a los efectos de la aplicación de la DMA en España, y por tanto estudio pionero en este campo.
- El inicio del desarrollo metodológico del *enfoque probabilístico dependiente de la hidrología* en el análisis económico con ambos módulos. Este enfoque es muy potente, ya que permite disminuir uno de los aspectos más criticados y débiles del enfoque de optimización, que es la hipótesis de conocimiento perfecto del futuro.

8.4. Valoraciones personales

Las siguientes recomendaciones personales no se derivan directamente de la aplicación de los modelos desarrollados, sino que responden a la pregunta de cómo empezar a implementar la inclusión de las consideraciones económicas en la planificación del agua, para gestionar la escasez y racionalizar su uso, a partir de las praxis presente en las agencias del agua.

Sin duda el principal desafío para las agencias que administran el agua, es conseguir que los usuarios privados perciban la escasez de este recurso, y que los gobiernos valoren (y estén dispuestos a pagar) por los usos públicos del agua.

Para atacar el problema de la escasez de volumen, el paso inicial es acabar con las tarifas planas y precisar el volumen suministrado, lo cual atañe principalmente a buena

parte de los regadíos. Para la escasez de calidad, un paso importante sería que *todos* los que vierten retornos no tratados paguen un cánon de vertido, de forma que esto los estimule a buscar métodos o técnicas para contaminar menos.

Posteriormente habría que pensar en la repercusión total de los costos. Y finalmente habría que pensar en introducir en las tarifas el costo de oportunidad del recurso, de forma que estos tengan estímulos perceptibles para restringir el consumo en épocas de escasez. Las tarifas han de servir para reordenar la gestión y el aprovechamiento del agua.

Una cuestión importante a dejar clara, es que aunque en esta tesis se empleen instrumentos económicos y mecanismos de mercado, no se está abogando por privatizar la gestión del agua. Hay muchas y poderosas razones para mantener la asignación del agua bajo control público. Pero esta gestión pública no puede ignorar e ir a contramano de la realidad económica; ni permanecer pasiva dejando hacer a los usuarios lo que les parezca.

Justamente es en el ámbito de la decisión pública donde las herramientas presentadas pueden colaborar dando respuestas que permitan tomar decisiones “socialmente factibles” y técnicamente aceptables.

8.5. Líneas futuras de investigación

Las tareas que podrían continuar el trabajo presentado y ampliar sus horizontes se ordenan en distintos grupos:

- a - Profundizar el conocimiento de la respuesta económica de los distintos usos de agua, para robustecer los parámetros económicos a introducir como datos en los modelos hidroeconómicos presentados. Especialmente enfocados a:
 - El uso agrícola por ser el mayor consumidor de recurso, de forma que la disposición a pagar de éstos usuarios condiciona fuertemente el valor marginal del recurso en los distintos puntos de la cuenca. Será altamente provechoso continuar el desarrollo y la mejora de los modelos agronómicos- socioeconómicos existentes que buscan representar el comportamiento de los regantes y su disposición de pago. El desarrollo de dichos modelos en un ambiente GIS se avizora como muy útil.
 - Los usos medioambientales y los turísticos-paisajísticos-lúdicos por ser los más desconocidos, y no existir antecedentes de valoración en España.
- b - Otro grupo corresponde a las mejoras “técnicas” de los modelos presentados:
 - El modelo EcoGes podría mejorarse cuando exista un algoritmo de optimización no lineal que permita introducir restricciones adicionales a las de la red de flujo.
 - Implementar el enfoque estocástico en los programas informáticos.
- c - Por último, en lo referido a la capacidad de representar los efectos antrópicos en el ciclo del agua, y saliendo de las cuestiones económicas presentadas en esta tesis,

sería deseable la inclusión de módulos que permitan modelar la calidad del agua y el efecto del de uso del suelo, para estudiar de forma más integral y realista las opciones existentes al momento de organizar y planificar el uso y conservación del agua y del territorio. El módulo de calidad del agua está actualmente en desarrollo dentro de nuestro grupo de trabajo.

Bibliografía

- [ACRES, 1998] ACRES (1998). *User's Manual ARSP Acres Reservoir Simulation Package*. ACRES International Ltd. <http://www.acres.com/company/water/arsp.htm>. 2.1.3
- [AEAS-AGA, 2003] AEAS-AGA (2003). Encuesta de tarifas 2002. Technical report, Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento. 3.3.1, 7.3.2
- [Aguilera Klink, 1998] Aguilera Klink, F. (1998). *Hacia una nueva economía del agua, cuestiones fundamentales*. Madrid. 1.1
- [Alexandre y Porto, 1999] Alexandre, N. R. y Porto, R. L. (1999). O sistema ModSimLS: um modelo de rede de fluxo para simulação de bacias hidrográficas. 2.1.3
- [Andreu, 1984] Andreu, J. (1984). *Aplicación del método de los Autovalores al análisis de Sistemas con Uso Conjunto de Recursos Hidráulicos Superficiales y Subterráneos*. PhD thesis, ETSICCP, Universidad Politécnica de Valencia. 2.4, 4.4.1
- [Andreu, 1992a] Andreu, J., editor (1992a). *Conceptos Y Métodos Para la Planificación Hidrológica*. Universidad Politécnica de Valencia. 2.1.1
- [Andreu, 1992b] Andreu, J. (1992b). *Manual de Usuario de OptiGes*. Universidad Politécnica de Valencia. 4.2, 4.2, C.1
- [Andreu et al., 1992] Andreu, J., Capilla Romá, J., y Ferrer Polo, J. (1992.). *Modelo SIMGES de Simulación de la Gestión de Recursos Hídricos, Incluyendo Utilización Conjunta - Manual Del Usuario (Versión 2.0)*. DIHMA - Universidad Politécnica de Valencia., <http://www.upv.es/aquatool>. 2.1.3, 5.1, E.1
- [Andreu et al., 1996] Andreu, J., Capilla Roma, J., y Sanchis, E. (1996). AQUATOOL, a generalized decision support system for water-resources planning and management. *Journal of Hydrology*, 177:269–291. 2.1.3, 4.2
- [Andreu y Sahuquillo Herráiz, 1987] Andreu, J. y Sahuquillo Herráiz, A. (1987). Efficient aquifer simulation in complex system. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 113 (1):110–129. 4.4.1
- [Andrews et al., 1992] Andrews, E. S., Chung, F. I., y Lund, J. R. (1992). Multilayers, priority-based simulation of conjunctive facilities. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 118:32–53. 2.1.3
- [Anton, 1997] Anton, H. (1997). *Introducción al Álgebra Lineal*. Editorial Limusa. 2.2.2

- [Arrojo Agudo, 2000] Arrojo Agudo, P. (2000). Valoración Económica y Financiera de los trasvases previstos en el Plan Hidrológico Nacional Español. Fundación Nueva Cultura del Agua, Congreso Ibérico de Gestión y Planificación del Agua, Zaragoza. 6.3, 6.3.2
- [Arrojo Agudo, 2002] Arrojo Agudo, P. (2002). Hacia una nueva racionalidad económica en la gestión del agua. III Congreso Ibérico de Gestión y Planificación del Agua, Sevilla. 1.1, 6.3
- [Arrow et al., 1996] Arrow, K. J., Cropper, M. L., Eads, G. C., Hahn, R. W., Lave, L. B., Noll, R. G., Portney, P. R., Russell, M., Schmalensee, R., Smith, V. K., y Stavins, R. N. (1996). Is There a Role for Benefit-Cost Analysis en Environmental, Health, and Safety Regulation? *Science*, 272:221–222. 2.3.3
- [Arumugam y Mohan, 1997] Arumugam, N. y Mohan, S. (1997). Integrated decision support system for tank irrigation system operation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 123 (5):266–273. 2.4
- [Azqueta y Ferreiro, 1994] Azqueta, D. y Ferreiro, A. E. (1994). *Análisis Económico Y Gestión de Recursos Naturales*. Alianza Editorial. 3.1.4, 3.1.5
- [Barros et al., 2003] Barros, M. T. L., Tsai, F. T.-C., Yang, S.-l., Lopes, J. E. G., y Yeh, W. W.-G. (2003). Optimization of large-scale hydropower system operations. *jo*, 129 (3):178–188. 2.4
- [Bazaraa y Jarvis, 1977] Bazaraa, M. S. y Jarvis, J. J. (1977). *Programación Lineal Y Flujo En Redes*. Editorial Limusa. Bib UPV 0-17/152. 2.2.2, 2.2.4
- [Bazzani, 2003] Bazzani, G. M. (2003). A DSS for an integrated analysis of irrigation at farm and catchment level: DSIRR. Institute for BioMeteorology (IBIMET), Bologna, Italia. 2.4
- [Belaine et al., 1999] Belaine, G., Peralta, R. C., y Hughes, T. C. (Mayo/Junio 1999). Simulation/Optimization modeling for water resources management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 125(3):154–161. 4.4
- [Benson et al., 2001] Benson, H. Y., Shanno, D. F., y Vanderbei, R. J. (Diciembre 2001). A comparative study of large-scale nonlinear optimization algorithms. Technical report. 2.2.4, 2.2.4
- [Bertsekas, 1991] Bertsekas, D. P. (1991). *Linear Network Optimization: Algorithms and Codes*. MIT Press. 2.2.4, 4.6.11
- [Blik, 2001] Blik, C. (2001). COCNUT deliverable d1, algorithms for solving nonlinear constrained and optimization problems: The state of the art. page 223. 2.2.3
- [BOE, 1985] BOE (1985). Ley de Aguas de España. 6.1

- [Boland et al., 1984] Boland, J. J., Dziegielewski, B., Baumann, D. D., y Optiz, E. M. (1984). Influence of price and rate structures on municipal and industrial use. Technical Report 84-C-2, U.S. Army Corps of Engrs., Inst. for Water Resources, Ft. Belvoir, Va. 3.3.4
- [Bontemps et al., 2001] Bontemps, C., Couture, S., y Favard, P. (2001). Is the irrigation water demand really convex? EAERE. Southampton, January 14th. 3
- [Booker y Young, 1994] Booker, J. F. y Young, R. A. (1994). Modelling intrastate and interstate markets for colorado river water resources. *Journal of Environment Economic Management*, 26:66–87. 2.4.1, 3.3.2
- [Braden, 2000] Braden, J. B. (Noviembre/Diciembre 2000). Value of valuation: Introduction. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 126 (6):336–338. 3.3.7
- [Brendecke et al., 1989] Brendecke, C. M., DeOreo, W. B., Payton, E. A., y Rozaklis, L. T. (1989). Network models of water rights and system operations. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 115(5):684–696. 2.1.3
- [Brooke et al., 1996] Brooke, A., Kendrick, D., y Wilson, A. (1996). “GAMS: A user’s guide”. *Scientific Press, Redwood City, California, USA*. 2.2.4, 4.3.3
- [Brown y Gregory, 1999] Brown, T. y Gregory, R. (1999). Why the WTA-WTP disparity matters. *Ecological Economics*, 28:323–335. 1
- [Brown et al., 1991] Brown, T., Taylor, J., y Shelby, B. (1991). Assessing the direct effects of streamflow on recreation: a literature review. *Water Resources Bulletin*, 27 (6):979–989. 3.3.6
- [Brown y Duffield, 1995] Brown, T. C. y Duffield, J. W. (1995). Testing part-whole valuation effects in contingent valuation of instream flow protection. *Water Resources Research*, 31 (9):2341–2351. 3.3.7
- [Bunge, 1990] Bunge, M. (1990). Política ambiental, técnica, ciencia, ética y educación. 1
- [Buras, 2001] Buras, N. (2001). Water resources, unresolvable issues. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 25(1):353. 2.1.1
- [Buras, 2000] Buras, N. (Marzo 2000). Building new water resources projects or managing existing systems? *Water International*, 25(1):110–114. 2.1.2
- [Caballer y Guadalajara, 1998] Caballer, V. y Guadalajara, N. (1998). *Valoración Económica Del Agua de Riego*. Ediciones Mundi-Prensa. 3.3.2
- [Cai et al., 2001] Cai, X., McKinney, D. C., y Lasdon, L. S. (2001). Piece-by-piece approach to solving large nonlinear water resources management models. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 127(6):363–368. <http://www.gams.de>. 2.4.1

- [Cai et al., 2003] Cai, X., McKinney, D. C., y Lasdon, L. S. (Enero/Febrero 2003). Integrated hydrologic-agronomic-economic model for river basin management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 129(1):4–17. 2.1.3
- [Carson et al., 1996] Carson, R., Flores, N., Martin, K., y Wright, J. (1996). Contingent valuation and revealed preference methodologies. *Land Economics*, 28 (2):80–99. 3.2.3
- [Chakravorty y Roumasset, 1994] Chakravorty, U. y Roumasset, J. (Noviembre/Diciembre 1994). Incorporating economic analysis in irrigation design and management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120(6):819–835. 2.4
- [Characklis et al., 1999] Characklis, G. W., Griffin, R. C., y Bedient, P. B. (1999). Improving the ability of water market to efficiently manage drought. *Water Resources Research*, 35 (3):823–831. 2.4.1
- [C.H.J., 1997] C.H.J. (1997). *Plan Hidrológico de Cuenca del Júcar (texto definitivo)*, chapter V. Confederación Hidrográfica del Júcar, M.M.A. 7.1, 7.2, 7.3, 7.4
- [C.H.J., 1999] C.H.J. (1999). Texto Unico del Plan Hidrológico del Júcar. Technical report, Confederación Hidrográfica del Júcar, M.M.A. 7.3.1
- [C.H.J., 2000] C.H.J. (2000). Análisis del sistema de recursos del río Júcar. Technical report, Oficina de Planificación Hidrológica, Confederación Hidrográfica del Júcar. 7.1.4
- [C.H.J., 2001] C.H.J. (2001). Revisión y actualización de los recursos hídricos superficiales del río Júcar. Technical report, Oficina de Planificación Hidrológica, Confederación Hidrográfica del Júcar. 7.1.4
- [C.H.J., 2004] C.H.J. (2004). Provisional Article 5 Report (V 2.0). Technical report, Confederación Hidrográfica del Júcar, M.M.A., España. 7.3.6
- [Chung et al., 1998] Chung, F. I., Archer, M. C., y Devries, J. J. (1998). Network flow algorithm applied to California aqueduct simulation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 115(2):131–147. 2.1.3
- [Colby, 1990] Colby, B. G. (1990). Enhancing instream flow benefits in an era of water marketing. *Water Resources Research*, 26 (6):1113–1120. 3.3.7
- [Coleman et al., 1997] Coleman, T. F., Czyzyk, J., Sun, C., Wagner, M., y Wright, S. (1997). pPCx: Parallel software for linear programming. *8 SIAM Conference on Parallel Processing in Scientific Computing, Minneapolis*. 2.2.4
- [Collazos, 2004] Collazos, G. (2004). *Manual de uso de MEvalGes - Programa para análisis económico de SRH*. IIAMA, Universidad Politécnica de Valencia. 5.4
- [Conn et al., 1992] Conn, R., Gould, N. I. M., y Toint, L. (1992). LANCELOT: a fortran package for large-scale nonlinear optimization (release a). Springer Verlag (Heidelberg, New York). Springer Series in Computational Mathematics, Volume 17. ISBN 3-540-55470-X, 1992. 2.2.4

- [Cornell, 1999] Cornell, G. (1999). *Visual Basic 6.0, Manual de Referencia*. Osborne McGraw-Hill. 5.5
- [Crocker y Forster, 1992] Crocker, T. D. y Forster, B. A. (Enero 1992). Valuing potential groundwater protection benefits. *water*, 27(1):1–6. 2.4
- [Dai y Labadie, 2001] Dai, T. y Labadie, J. W. (2001). River basin network model for integrated water Quantity/Quality management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 127(5):295–305. 2.1.3, 5.3.5
- [Dandy et al., 1997] Dandy, G. C., Connarty, M. C., y Loucks, D. P. (Noviembre/Diciembre 1997). Comparison of methods for yield assessment of multiple reservoir systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 123(6):350–358. 2.1.3
- [Daubert y Young, 1981] Daubert, J. y Young, R. (1981). Recreational demands for maintaining instream flows: a contingent valuation approach. *American Journal of Agricultural Economics*, 63 (4):666–675. 3.3.6
- [de Azevedo et al., 2000] de Azevedo, G. L., Gates, T. K., Fontane, D. G., Labadie, J. W., y Porto, R. L. (Marzo/Abril 2000). Integration of water quantity and quality in strategic river basin planning. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 126, nro. 2:85–97. 2.1.3, 5.3.5
- [Delft Hydraulics, 1991] Delft Hydraulics (1991). RIBSIM: River basin simulation. Technical report, Project Completion Rep. to Water Resources Planning Commission, Taipei, Taiwan. 2.1.3
- [DGOH, 1982] DGOH (1982). Modelo matemático de simulación para el sistema hidrográfico conjunto de los ríos Júcar y Turia. Technical report, Dirección General de Obras Hidráulicas. Convenio de cooperación entre la Dirección General de Obras Hidráulicas y la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Valencia. 3
- [Diamond y Hausman, 1994] Diamond, P. y Hausman, J. A. (1994). Contingent valuation: Is some number better than no number? *Journal of Economics Perspective*, 8 (4):45–64. 3.2.3
- [Díaz y Brown, 1999] Díaz, G. E. y Brown, T. C. (1999). *AQUARIUS: A Modeling System for River Basin Water Allocation*. 2.4.1, 3.2.4, 3.3.1, 3.3.2, 3, 3.3.6, 4.3.7, 7.3.5
- [DIHMA, 1997] DIHMA (1997). Modelos de evaluación y gestión de recursos hidráulicos del Júcar, incluyendo el análisis del comportamiento del acuífero de la Plana. Technical report, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia. 7.1.4
- [Dinar y Letey, 1996] Dinar, A. y Letey, J. (1996). *Modeling Economic Management and Policy Issues of Water in Irrigated Agriculture*. Praeger Publisher. 3.2.1
- [Dourojeanni et al., 2002] Dourojeanni, A., Jouravlev, A., y Chávez, G. (2002). Gestión del agua a nivel de cuencas: Teoría y práctica. *CEPAL, Serie Recursos Naturales e Infraestructura*. <http://www.eclac.cl>. 1.1, 5.3

- [Draper et al., 2003] Draper, A. J., Jenkins, M. W., Kirby, K. W., Lund, J. R., y Howitt, R. E. (2003). Economic-engineering optimization for california water management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 129(3):155–164. 2.4.1
- [Duffield et al., 1992] Duffield, J. W., Neher, C. J., y Brown, T. C. (1992). Recreation benefits of instream flow: Application to montana´s big hole and bitterroot rivers. *Water Resouces Research*, 28 (9):2169–2181. 3.3.6
- [Dunn et al., 1996] Dunn, S. M., Mackay, R., Adams, R., y Oglethorpe, D. R. (1996). The hydrological component of the NELUP decision-support system: An appraisal. *Journal Hydro.*, 177:213–235. 2.1.3
- [Dziegielewski y Boland, 1989] Dziegielewski, B. y Boland, J. J. (1989). Forecasting urban water use: The IWRMAIN model. *Water Resources Bulletin*, 25 (1):101–109. 3.3.1
- [Edwards-Jones et al., 2000] Edwards-Jones, G., Davies, B., y Hussain, S. (2000). *Ecological Economics, an introduction*. Blackwell Science Ltd., www.blackwell-science.com. 2.3.3, 2.3.4, 3.1.3, 3.2
- [Epelly O. y Vial, 2000] Epelly O., G. J. y Vial, J. (Julio, 2000). An interior point solver for smooth convex optimization with an application to environmental-energy-economic models. Technical Report 2000.08, Department of Management Studies, University of Geneva, Switzerland. 2.2.4
- [Eschenbach et al., 2001] Eschenbach, E. A., Magee, T., Zagona, E., Goranflo, M., y Shane, R. (Marzo/Abril 2001). Goal programming decision support system for multiobjective operation of reservoir systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 127(2):108–120. 2.1.2
- [Estrela, 2003] Estrela, T. (2003). Evaluación de las guías de la directiva marco europea en políticas de aguas en aspectos relacionados con las aguas subterráneas en la cuenca del júcar, españa. *www.chj.es*. 7.1.1
- [Faisal et al., 1994] Faisal, I. M., Young, R. A., y Warner, J. W. (1994). An integrated economic hydrologic model for groundwater basin management. Technical report, Colorado Water Resources Research Institute, Fort Collins, Colorado. 2.4
- [Fedra y Jamieson, 1996] Fedra, K. y Jamieson, D. G. (1996). The WaterWare decision-support system for river basin planning 2. planning capability. *Journal Hydro.*, 177:177–198. 2.1.3
- [Ferrer Polo et al., 2002] Ferrer Polo, F. J., Vela Mayorga, A., y Andreu, J. (2002). Gestión Colectiva Sostenible de la Unidad Hidrogeológica 08-29 (Acuífero de la Mancha Oriental - España). *IIAMA*. 7.3.1
- [Fischer et al., 1989] Fischer, S., Dornbusch, R., y Schmalensee, R. (1989). *Economía*. McGraw-Hill. 2.3

- [Font Vicent, 2004] Font Vicent, E. (2004). EFC: Colaboración en el desarrollo y aplicación de un modelo matemático distribuido de flujo subterráneo de la Unidad Hidrogeológica 08.29 Mancha Oriental, en las provincias de Albacete, Cuenca y Valencia. 7.3.1
- [Ford, 1990] Ford, D. T. (1990). Reservoir storage reallocation analysis with PC. *Water Resources Planning and Management*, 116 (3):402–216. 2.1.3
- [Fredericks et al., 1998] Fredericks, J. W., Labadie, J. W., y Altenhofen, J. M. (Marzo/Abril 1998). Decision support system for conjunctive stream-aquifer management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 124(2):69–78. 2.1.3
- [García Mollá, 2000] García Mollá, M. (2000). *Análisis de la influencia de los Costes en el Consumo de Agua en la Agricultura Valenciana*. PhD thesis, Universidad Politécnica de Valencia. 3, 3.3.2, 7.3.1, 7.3.1, 7.12, 7.13
- [Gibbens y Goodman, 2000] Gibbens, G. y Goodman, J. (Mayo 2000). Integration of GIS and the river basin network flow model MODSIM, Case Study: Wind River Irrigation Project, Wyoming. Technical report, Department of Civil Engineering, Colorado State University. 2.4
- [Gibbons, 1986] Gibbons, D. (1986). *The Economic Value of Water*. Resources for the future - The Johns Hopkins University Press, Washington. 3.2.1, 3.3.3, 3.3.4
- [Gondzio, 1995] Gondzio, J. (1995). HOPDM (version 2.12) – a fast LP solver based on a primal-dual interior point method. *European Journal of Operational Research*, 85:221–225. 2.2.4
- [Grigg, 1996] Grigg, N. S. (1996). *Water Resources Management; Principles, Regulation and Cases*. McGraw-Hill, New York. 2.1.3
- [Hall y Dracup, 1970] Hall, W. A. y Dracup, J. A. (1970). *Water Resources Systems Engineering*. Series in Water Resources and Environmental Engineering. McGraw-Hill, New York. 2.1
- [Hanemann, 1994] Hanemann, M. (1994). Valuing the environment through contingent valuation. *Journal Economic Perspective*, 8 (4):19–43. 3.2.3
- [Hanemann, 2003] Hanemann, M. (2003). Apendix c- economic findings and recommendations. In Fundación Universidad Politécnica de Cartagena, Murcia, E., editor, *A Technical Review of the Spanish National Hydrological Plan (Ebro River out-of-basin diversion)*. 6.3
- [Hanke y Walker, 1974] Hanke, S. H. y Walker, R. A. (1974). Benefit-cost analysis reconsidered: An evaluation of the mid-state project. *Water Resources Research*, 10 (5):898–908. 2.3.3
- [Hazell y Norton, 1986] Hazell, P. B. y Norton, R. D. (1986). *Mathematical Programming for Economic Analysis in Agriculture*. MacMillan Publishing Company, New York, USA. 3.2.4

- [Heady et al., 1973] Heady, E. O., Madsen, H. C., Nicol, K. J., y H., H. S. (1973). National and interregional models of water demand, land use, and agricultural policies. *Water Resources Research*, 9 (4):777–791. 3.2.4
- [HEC, 1994] HEC (1994). HEC-PRM package: Draft documentation for prescriptive reservoir model. Technical report, Hydrologic Engineering Center, Davis, California. 2.4.1
- [HEC, 2003] HEC (2003). *HEC-ResSim (Reservoir System Simulation): Manual de Usuario*. Hydrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineers. 2.1.3
- [Helgason y Kennington, 1980] Helgason, R. V. y Kennington, J. L. (1980). *Algorithms for Network Programming*. John Wiley. 2.2.4
- [Herrero Miñano, 2002] Herrero Miñano, R. (2002). EFC: Gestión del sistema de la cuenca del Júcar basada en riesgo de sequías, con revisión de aportaciones aguas arriba del embalse de Tous. 7.3.6
- [Hillier y Lieberman, 1991] Hillier, F. S. y Lieberman, G. J. (1991). *Introducción a la Investigación de Operaciones*. McGraw-Hill. 2.2.2
- [Hochbaum y Shanthikumar, 1990] Hochbaum, D. S. y Shanthikumar, J. G. (Octubre 1990). Convex separable optimization is not much harder than linear optimization. *Journal of the Association for Computing Machinery*, 37(4):843–862. 2.2.3
- [Howitt et al., 1999] Howitt, R. E., Lund, J. R., Kirby, K. W., Jenkins, M. W., y Draper, A. J. (1999). Integrated economic-engineering analysis of california’s future water supply. Technical report, Center for Environmental and Water Resources Economics, University of California, Davis. 3.2.4, 3.3.2
- [IGME, 1980] IGME (1980). El Sistema Hidrogeológico de Albacete (Mancha Oriental). Technical report, Instituto Geológico y Minero de España. 7.1.4
- [INE, 1998] INE (1998). Encuesta Nacional del año 1996. Technical report, Instituto Nacional de Estadística, España. 3.3.1
- [Ito et al., 2001] Ito, K., Xu, Z. X., Jinno, K., Kojiri, T., y Kawamura, A. (Julio/Agosto 2001). Decision support system for surface water planning in river basins. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 127(4):272–276. 2.1.2, 2.1.3
- [James y Lee, 1971] James, L. D. y Lee, R. R. (1971). *Economics of Water Resources Planning*. McGraw-Hill. 2.3.3
- [Jamieson y Fedra, 1996] Jamieson, D. G. y Fedra, K. (1996). The WaterWare decision-support system for river basin planning 1. conceptual design. *Journal Hydro.*, 177:163–175. 2.1.3
- [Jaramillo Álvarez, 1998] Jaramillo Álvarez, P. G. (1998). *Desarrollo de un Sistema Soporte a la Decisión para la Asignación de Recursos Naturales, con Satisfacción de Múltiples Objetivos y Múltiples Decisores*. PhD thesis, D.I.H.M.A. - Universidad Politécnica de Valencia. 2.1.2

- [Kassem et al., 1994] Kassem, A. M., Tate, D. M., y Dossett, P. A. (1994). *The Water Use Analysis Model (WUAM) Demonstration*. Environmental Conservation Service, Ottawa, Ontario, Canadá. 2.1.3, 2.1.3
- [Krutilla y Fisher, 1985] Krutilla, J. V. y Fisher, A. C. (1985). *The economics of Natural Environments*. Johns Hopkind University Press for Resources for then Future, Baltimore. 3.2.1
- [Kuczera, 1990] Kuczera, G. (1990). WATHNET: Generalised water supply simulation using network linear programming. Technical report, Dept. of Civil Engrg. and Surv., University of Newcastle. 2.1.3
- [Labadie, 1994] Labadie, J. W. (1994). MODSIM: Interactive river basin network flow model. Technical report, Department of Civil Engineering, Colorado State University. <http://129.82.224.229/concepts/moddoc.html>. 2.1.3
- [Labadie et al., 1984] Labadie, J. W., Pineda, A. M., y Bode, D. A. (1984). *Network Analysis of Raw Supplies under Complex Water Rights and Exchanges: Document for Program MODSIM3*. Colorado Water Resources Institute, Fort Collins, Colorado. 2.1.3
- [LBA, 2000] LBA (2000). *Libro Blanco Del Agua En España*. Ministerio de Medio Ambiente de España. 3.3.1, 6.4.2, 3
- [Lefkoff y Gorelick, 1990] Lefkoff, J. y Gorelick, S. M. (1990). Benefits of an irrigation rental market in a saline stream-aquifer system. *Water Resources Research*, 26 (7):1371–1381. 2.4
- [Löbel, 1998] Löbel, A. (1998). MCF 1.2: A network simplex implelementation. Technical report, Technische Univerität Berlin. 2.2.4
- [Loomis, 2000] Loomis, J. B. (2000). Environmental valuation techniques in water resource decision making. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 126 (6):339–344. 3.3.7
- [Loucks et al., 1993] Loucks, D. P., French, P. N., y Taylor, M. R. (1993). *IRAS An Interactive simulation of River-Aquifer System*. Dept. of Civ. and Environmental Engrg., Cornell University, Ithaca, New York. 2.1.3
- [Loucks et al., 1981] Loucks, D. P., Stedinger, J. R., y Haith, D. A. (1981). *Water Resources System Planing and Analysis*. Prentice-Hall. 1.2, 2.1.1, 3.1.5
- [Luenberger, 1984] Luenberger, D. E. (1984). *Programación lineal y no lineal*. Addison-Wesley Iberoamericana, Wilmington, Delaware. 2.2.2
- [Major y Lenton, 1979] Major, D. C. y Lenton, R. L. (1979). *Applied Water Resorce System Planing (Cap. 3)*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07632. 2.1.1
- [Marco, 1993] Marco, J. B. (1993). *Hidrología Estocástica y Planeamiento Hdráulico*, pages 97–105. Joaquín Andreu (Ed.). 7.5.5

- [Martin, 1983] Martin, Q. W. (1983). Optimal operation of multiple reservoir system. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 106(1):58–74. 2.1.3, 2.4
- [Martos et al., 1999] Martos, J. C., Roldán, J., y Andreu, J. (1999). Modelo para la distribución óptima del agua para uso agrícola en una cuenca. aplicación a la cuenca del Guadalquivir. Murcia. XVII Congreso Nacional de Riegos. 2.1.2
- [Matsukawa et al., 1992] Matsukawa, J., Finney, B. a., y Willis, R. (Marzo/Abril 1992). Conjunctive-Use Planning in Mad River Basin, California. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 118(2):115–132. 2.4
- [Mays, 1996] Mays, L. W. (1996). *Water Resources Handbook*. McGraw-Hill. 1.2
- [McBride, 1985] McBride, R. D. (1985). Solving embedded generalized network problems. *European Journal Operational Research*, 21:82–92. 2.2.4, 2.4.1
- [McDonald y Harbaugh, 1988] McDonald, M. G. y Harbaugh, A. W. (1988). *A modular three-dimensional finite-difference ground water flow model*. U. S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, <http://water.usgs.gov/software>. 4.4.1
- [McKinney y Cai, 2002] McKinney, D. C. y Cai, X. (2002). Linking GIS and water resources management models: an object-oriented method. *Environmental Modelling and Software*, 17:413–425. 2.1.3
- [Merritt y Mar, 1969] Merritt, L. B. y Mar, B. W. (1969). Marginal value of dilution water. *Water Resources Research*, 5(6):1186–1191. 3.3.5
- [Mészáros, 1998] Mészáros, C. (1998). The BPMPD interior point solver for convex quadratic problems. Technical Report W98-8, Laboratory of Operations Research and Decision Systems, Hungarian Academy of Sciences. 2.2.4
- [Mijangos, 2000] Mijangos, E. (2000). On superlinear multiplier update methods for partial augmented lagrangian techniques. *MSC*. 2.2.4
- [MMA, 2001] MMA (2001). *Plan Hidrológico Nacional de España*. Ministerio de Medio Ambiente de España. 3.3.2, 3.3.2, 3.3.2, 6.1, 1, 7.3.2, 7.3.2
- [MMA, 2004] MMA (2004). Curvas de Demanda Agrarias para las UDAs de la cuenca del Júcar. Technical report, Confederación Hidrográfica del Júcar, M.M.A., España. 7.3.1
- [More y Wright, 1993] More, J. J. y Wright, S. J. (1993). Optimization software guide. Technical report, Argonne National Laboratory. 2.2.4
- [MS, 2002] MS (2002). Estudio de utilización conjunta de los recursos hídricos superficiales y subterráneos en las cuencas media y baja de los ríos Júcar y Turia. Informe final. Technical report, MS Ingenieros para Confederación Hidrográfica del Júcar. 7.2, 7.4.1

- [Murtgah y Saunders, 1987] Murtgah, B. A. y Saunders, M. A. (1987). MINOS 5.1 user's guide. Technical Report 50 L83-20 R, Dept. of Operation Research, Stanford University. 2.2.4
- [Naredo y Gascó, 1994] Naredo, J. M. y Gascó, J. M. (1994). Spanish water accounts. Technical Report ENV/EPOC/SE/A(94)2, OECD, Environment Policy Committee, Paris. 3.3.2
- [Newlin et al., 2002] Newlin, B. D., Jenkins, M. W., Lund, J. R., y Howitt, R. E. (2002). Southern California Water Markets: Potential and Limitations. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 128 (1):21–32. 2.4.1
- [Niedda y Sechi, 1996] Niedda, M. y Sechi, G. M. (Noviembre/Diciembre 1996). Mixed optimization technique for large-scale water-resource systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 122:387–393. 2.4.1
- [Niemczynowicz, 2000] Niemczynowicz, J. (Marzo 2000). Present challenges in water management: A need to see connections and interactions. *Water International*, 25:139–147. 1.1
- [Ochoa Rivera, 2002] Ochoa Rivera, J. C. (2002). *Modelo Estocástico de Redes Neuronales Para la Síntesis de Caudales Aplicados a la Gestión Probabilística de Sequías*. PhD thesis, DIHMA, Universidad Politécnica de Valencia. 2.1.3
- [ONU, 1992] ONU (1992). *Conferencia Internacional Sobre el Agua Y el Medio Ambiente de Dublín*. 1.1
- [ONU/WCED, 1987] ONU/WCED (1987). *Nuestro Futuro Común: Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (Comisión Brundtland)*. Oxford University Press. 1.1
- [ONU/WWAP, 2003] ONU/WWAP (2003). *Informe de Las Naciones Unidas Sobre el Desarrollo de Los Recursos Hídricos En el Mundo: Agua Para Todos, Agua Para la Vida*. París, Nueva York y Oxford, UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura) y Berghahn Books. 1.1, 3.1.1
- [Palinisami y Easter, 1984] Palinisami, K. y Easter, K. W. (1984). Ex Post Evaluation of Flood Control Investments: a Case Study in North Dakota. *Water Resources Research*, 20 (12):1785–1790. 2.3.3
- [Pallottino, 1999] Pallottino, S. (1999). A DSS for water resources management under uncertainty. *Dipartimento di Informatica, Università' di Pisa*, pages 96–101. 2.1.3
- [Palmer et al., 1980] Palmer, R. N., Wright, J. R., Smith, J. A., Cohon, J. L., y Revelle, C. S. (1980). Policy analysis of reservoir operation in the Potomac river basin. *executive summary*, volume I. 2.1.3
- [Pearce y Turner, 1990] Pearce, D. W. y Turner, R. K. (1990). *Economics of Natural Resources and the Environment*. The Johns Hopkins University Press, 701 West 40th Street - Baltimore Maryland 21211. 2.3.4

- [Percia et al., 1997] Percia, C., Oron, G., y Mehrz, A. (Marzo/Abril 1997). Optimal operation of regional system with diverse water quality sources. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 123(2):105–115. 2.1.3, 5.3.5
- [Pulido Velázquez, 2003] Pulido Velázquez, M. A. (2003). *Optimización económica de la gestión del uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas en un Sistema de Recursos Hídricos*. PhD thesis, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia. 2.4
- [Raskin et al., 2001] Raskin, P., Sieber, J., y Huber-Lee, A. (julio 2001). *User Guide for WEAP 21*. Stockholm Environment Institute - Boston. 2.1.3
- [Region, 2000] Region, P. N. (2000). River and Reservoir Operations Simulation of the Snake River, Application of MODSIM to the Snake River Basin. Technical report, Bureau of Reclamation U. S. 2.1.3
- [Renzetti, 1988] Renzetti, S. (1988). An econometric study of industrial water demands in british columbia, canada. *Water Resources Research*, 24 (10):1569–1573. 3.3.4
- [Reynolds et al., 1992] Reynolds, P. J., Tate, D. M., y Kassem, A. M. (1992). *Model integration for water Use, Quality and Supply*. M. Benedini et. al. (Eds.), IAHR, Balkema, Rotterdam. 2.1.3
- [Rosegrant et al., 2000] Rosegrant, M. W., Ringler, C., McKinney, D. C., Cai, X., Keller, A., y Donoso, G. (2000). Integrated economic-hydrologic water modeling at the basin scale: the maipo river basin. *Agricultural Economics*, 24 (1):33–46. 2.1.3
- [Sahuquillo, 1983] Sahuquillo, A. (Febrero 1983). An eigenvalue numerical technique for solving unsteady linear groundwater models continuously in time. *Water Resources Research*, 19(1):87–93. 4.4.1
- [Sahuquillo Herráiz, 1983] Sahuquillo Herráiz, A. (1983). Panorámica mundial. tipología del uso conjunto. In *Curso sobre Utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas*, volume 10 (2), pages A1–A19. Valencia-Castellón de La Plana. 4.4
- [Sahuquillo Herráiz, 1985] Sahuquillo Herráiz, A. (1985). Groundwater in water resources planning: Conjunctive use. *Water International*, 10 (2):57–64. 4.4
- [Scales, 1985] Scales, L. E. (1985). *Introduction to Non-linear Optimization*. Macmillan Publishers Ltd., London and Basingstoke. 2.2.3
- [Schneider y Whitlatch, 1991] Schneider, M. L. y Whitlatch, E. (Enero/Febrero 1991). User-specific water demand elasticities. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 117(1):52–73. 3.3.1
- [Schulze et al., 1996] Schulze, W., McClelland, G., D., W., y Lazo, J. (1996). *Sources of bias in Contingent Valuation. The Contingent Valuation of Environmental Resources: Methodological Issues and Research Needs*. Bjornstad D. J. and Kahan, J. R. eds. Edwaed Elgar, Brookfield. 3.2.3

- [Schuster, 1987] Schuster, R. J. (1987). Colorado river simulation system executive summary. Technical report, U.S. Bureau of Reclamation, Engineering and Research Center, Denver, Colorado. 2.1.3
- [Scott y Read, 1997] Scott, T. J. y Read, E. G. (1997). Modelling hydro reservoir operation in a deregulated electricity market. Technical report, Energy Modelling Research Group, University of Canterbury, New Zealand. 2.4
- [Shelton, 1979] Shelton, R. A. (1979). Management of TVA reservoir systems. *Proceedings of national workshop on reservoir systems operations*. 2.1.3
- [Sigvaldason, 1976] Sigvaldason, O. T. (Abril 1976). A simulation model for operating a multipurpose multireservoir system. *Water Resources Research*, 12, nro. 2:263–278. 2.1.3
- [Simonovic, 2000] Simonovic, S. P. (2000). Last resort algorithms for optimization of water resources systems. *Water International*, 25(1):76–88. 2.1.3
- [Sophocleous et al., 1999] Sophocleous, M. A., Koelliker, J. K., Govindaraju, R. S., Birdie, T., Ramireddygar, S. R., y Perkins, S. P. (1999). Integrated numerical modeling for basin-wide water management: the case of the rattlesnake creek basin in south central kansas. *Journal of Hydrology*, 214:179–196. 2.1.3
- [Strzepek et al., 1989] Strzepek, K. M., García, L., y Over, T. (1989). *MITSIMZ. I river basin simulation model users manual*. Centre for Advanced Decision Support for Water and Environmental Systems, University of Colorado, Boulder, Colorado. 2.1.3
- [Sumpsi Viñas, 2002] Sumpsi Viñas, J. M. (2002). Efectos de las políticas tarifarias sobre la demanda de agua, renta agraria y recuperación de costes de la agricultura de regadío en españa. III Congreso Ibérico de Gestión y Planificación del Agua, Sevilla. 3.3.2
- [Sumpsi Viñas et al., 1998] Sumpsi Viñas, J. M., Garrido Colmenero, A., Blanco Fonseca, M., Varela Ortega, C., y Iglesias Martínez, E. (1998). *Economía Y Política de Gestión Del Agua En la Agricultura*. Ediciones Mundi-Prensa. 1.1, 3.3.2, 3.3.2, 7.3.1, 4
- [Sun et al., 1995] Sun, Y.-H., Yeh, W. W.-G., Hsu, N.-S., y Louise, P. W. (1995). Generalized network algorithm for water-supply-system optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 121(5):392–398. 2.2.2, 2.4.1
- [Taylor y Young, 1995] Taylor, R. G. y Young, R. A. (1995). Rural-to-urban water transfers: measuring direct foregone benefits of irrigation water under uncertain water supplies. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 20 (2):247–262. 3.3.2
- [Tietenberg, 1992] Tietenberg, T. (1992). *Environmental and natural resource economics*. Harper Collins Publishers, New York, third edition. 3.3.5
- [Toint y Tuyttens, 1990] Toint, L. y Tuyttens, D. (1990). On large scale nonlinear network optimization. *Mathematical Programming, Serie B*, 48(1):125–159. 2.2.4, 4.3.3

- [Toint y Tuyttens, 1992] Toint, L. y Tuyttens, D. (1992). LSNNO: A fortran subroutine for solving large-scale nonlinear network optimization problems. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 18 (3):308–328. 2.2.4, 4.3.3
- [TWDB, 1972] TWDB (1972). *Economic Optimization and simulation techniques for management of regional water resources systems: program SIMYLD-II*. Texas Water Development Board, System Engineering Division. 2.1.3
- [UE, 2000] UE (23/oct/2000). Directiva Marco Del Agua. Unión Europea. 3.1.1, 3.3.2, 5
- [UNCED, 1992] UNCED (1992). Agenda 21: Programa de acción sustentable para el desarrollo. Naciones Unidas, Conferencia del Ambiente y el Desarrollo. 1.1
- [USEPA, 2000] USEPA (2000). Guidelines for preparing economic analysis. *U.S. Environmental Protection Agency*, page 179. 5.3.1
- [Vanderbei, 1997] Vanderbei, R. J. (1997). LOQO user's manual, version 3.10. Technical Report SOR-97-08, Department of Civil Engineering and Operations Research, Princeton University. 2.2.4
- [Varela-Ortega et al., 1998] Varela-Ortega, C., Sumpsi, J. M., Garrido, A., Blanco, M., y E., I. (1998). Water pricing policies, public decision-making and farmers response. implications for water policy. *Agricultural Economics*, 19 (1-2):193–202. 3
- [Vaux y Howitt, 1984] Vaux, H. J. y Howitt, R. E. (1984). Managing water scarcity: an evaluation of interregional transfers. *Water Resources Research*, 20 (7):785–792. 2.4.1, 3.3.2
- [VUT, 2001] VUT (junio 2001). *REALM User's Manual (Version W1.4h)*. Victoria University of Technology and Department of Natural Resources and Environment. 2.1.3
- [Walsh et al., 1992] Walsh, R. G., Johnson, D. M., y McKean, J. R. (Marzo 1992). Benefit transfer of outdoor recreation demand studies, 1968-1988. *Water Resources Research*, 28:707–713. 3.3.6
- [Waltz y Nocedal, 2003] Waltz, R. A. y Nocedal, J. (Abril, 2003). KNITRO user's manual. Technical Report OTC 2003/05, Optimization Technology Center, Northwestern University, Evanston, USA. 2.2.4
- [Westphal et al., 2003] Westphal, K. S., Vogel, R. M., Kirshen, P., y Chapra, S. C. (2003). Decision Support System for Adaptive Water Supply Management. *Journal of Water resources Planning and Management*, 129 (3):165–177. 2.1.2
- [Winston, 1991] Winston, W. L. (1991). *Investigación de Operaciones (Aplicaciones Y Algoritmos)*. Grupo Editorial Iberoamérica. 2.2.3
- [Wurbs, 1993] Wurbs, R. A. (1993). Reservoir-system simulation and optimization models. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 119(4):455–472. 2.1.3

- [Wurbs, 2003] Wurbs, R. A. (August 2003). *Water Rights Analysis Package (WRAP), Modeling System Reference Manual*. Texas Water Resources Institute. 2.1.3
- [Yeh, 1985] Yeh, W. W.-G. (1985). Reservoir management and operation models: A state-of-the-art review. *Water Resources Research*, 21(12):1797–1818. 2.1.3, 2.1.3
- [Young, 1985] Young, H. (1985). Cost allocation: Methods, principles, and applications. *Elsevier Pbl.*, page 205. 1
- [Young et al., 1982] Young, H. P., Okada, N., y Hashimoto, T. (Junio 1982). Cost allocation in water resources development. *Water Resources Research*, 18(3):463–475. 1
- [Young, 1996a] Young, R. A. (1996a). Measuring economic benefits for water investments and policies. Technical Report Technical Paper Nro. 338, World Bank. 3.1.3, 3.2.1
- [Young, 1996b] Young, R. A. (1996b). *Water Resources Handbook*, chapter 3: Water Economics. McGraw-Hill. 1.1, 2.1.2, 3.1.2, 3.1.3, 3.3.5
- [Young y Gray, 1985] Young, R. A. y Gray, L. (Diciembre 1985). Input-output models, economic surplus, and evaluation of state or regional water plans. *Water Resources Research*, 21(12):1819–1823. H
- [Zagona et al., 1998] Zagona, E. A., Fulp, T. J., Goranflo, H. M., y Shane, R. M. (1998). RIVERWARE: a general river and reservoir modeling environment. pages 113–120 (5), Las Vegas, Nevada. 2.1.3

APÉNDICES

Apéndice A: Ejemplo de la importancia del punto inicial en optimización no lineal

A continuación se estudiará un caso de ejemplo simple pero problemático, debido a la función de precio de los arcos (o función de costo/beneficio unitario).

En la red que se muestra a la derecha los arcos rojo (1) y verde (2) están en “paralelo”, mientras que el arco gris (3) es el arco de cierre, que hace conservativa la red.

La función objetivo a minimizar es:

$$FO_{total} = FO_1 + FO_2 = f_1 \cdot x_1 + f_2 \cdot x_2$$

$$f_1 = 45 - 0,042 \cdot x_1 \quad f_2 = 30$$

sujeta a: $x_1 + x_2 = 700$

En la Figura A.1, las líneas delgadas representan las funciones de precio por c/u de los arcos (f_1 y f_2) y las líneas gruesas las funciones objetivo (FO_1 y FO_2).

La escala sobre el eje x es creciente para el arco 1 (rojo) y decreciente para el arco 2 (verde), de forma que situados en un punto cualquiera del eje x conocemos los flujos por los 2 arcos y el valor de la FO_{total} en color mostaza.

Se marca con una línea vertical de puntos el valor máximo de FO_{total} . En este ejemplo, se puede hallar analíticamente el máximo:

$$x_2 = (C - x_1) \quad (C = 700 \text{ en este ejemplo})$$

$$FO = a_1 \cdot x_1^2 + b_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2^2 + b_2 \cdot x_2$$

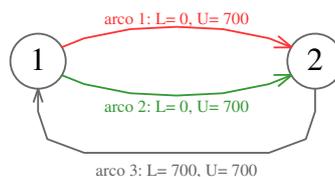


Figura A.1: Red de flujo de ejemplo.

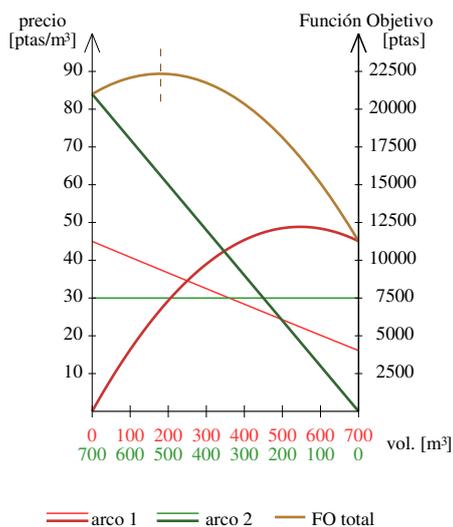


Figura A.2: Función objetivo y precio.

$$FO = a_1 \cdot x_1^2 + b_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot (C - x_1)^2 + b_2 \cdot (C - x_1)$$

$$FO = a_1 \cdot x_1^2 + b_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot C^2 - 2 \cdot a_2 \cdot C \cdot x_1 + a_2 \cdot x_1^2 + b_2 \cdot C - b_2 \cdot x_1$$

$$FO = (a_1 + a_2) \cdot x_1^2 + (b_1 - b_2 - 2 \cdot a_2 \cdot C) \cdot x_1 + (a_2 \cdot C^2 + b_2 \cdot C)$$

Hallamos la derivada y la igualamos a cero:

$$\partial FO / \partial x_1 = 2 \cdot (a_1 + a_2) \cdot x_1 + (b_1 - b_2 - 2 \cdot a_2 \cdot C) = 0$$

$$x_{1max} = (b_1 - b_2 - 2 \cdot a_2 \cdot C) / (-2 \cdot (a_1 + a_2))$$

$$x_{1max} = 178,57$$

Entonces, según los valores iniciales, se alcanza un mínimo local u otro:

- Si $x_{1ini} \leq 178,57$ (y por ende $x_{1ini} \geq 521,43$) $\implies FO = 21000$
- Si $x_{1ini} \geq 178,57$ (y por ende $x_{1ini} \leq 521,43$) $\implies FO = 11275$ (mínimo global)

Aunque ambas funciones (FO_1 y FO_2) cumplen las condiciones pedidas por el algoritmo de optimización (continuas y dos veces continuamente derivable en el dominio); esto sólo no basta para garantizar que el algoritmo de optimización nos conducirá al mínimo global.

El punto máximo o “*divisoria de aguas de la búsqueda*” ocurre donde la pendiente de la FO_i es igual en los dos arcos. (supongo que en un caso de más variables serán los valores para los cuales la suma de las derivadas parciales a lo largo de un ciclo cerrado sea nula).

La contribución a la FO de cada arco es:

$$FO_i = a \cdot x_i + b \cdot x_i^2 + c \cdot x_i^3 + (d \cdot x_i) / (x_i + e)$$

y el gradiente en la dirección de cada variable es:

$$\frac{\partial FO_i}{\partial x_i} = a + 2 \cdot b \cdot x_i + 3 \cdot c \cdot x_i^2 + (d \cdot e) / (x_i + e)^2$$

En este caso en particular: $\frac{\partial FO_i}{\partial x_1} = 45 - 0,084 \cdot x_1$ $\frac{\partial FO_i}{\partial x_2} = 30$

y por lo tanto: $x_1 = -15 / -0,084 \simeq 178,57$

Entonces el algoritmo del gradiente, se moverá hacia valores crecientes o decrecientes de x_1 dependiendo del punto actual donde se evalúan las derivadas parciales.

Lógicamente que con funciones más complejas y redes más grandes, habrá muchos mínimos locales, no solamente dos.

Apéndice B: Funciones de costo del Caso PHN

Los pasos para conseguir las funciones de costos son los siguientes:

Con los valores del eje y (costo):

1. Se parte del costo de construcción (C_C) calculado para 7 tamaños distintos.

Estos puntos están unidos linealmente, como se ve en la Figura B.1. Solamente hay que mencionar que el primer punto no debería ser (0; 0) sino (0; C_0), ya que para un caudal cercano a cero los costos fijos seguirán existiendo.

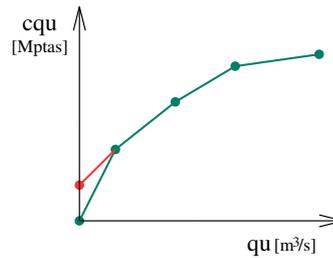


Figura B.1: Costo de construcción.

2. Para cada punto, este costo de construcción se transforma en el costo de amortización, operación y mantenimiento (A+O+M). Para esto se hace:

$$C_{A+O+M} = C_C \cdot \left(\frac{1}{coef} + 0,012 \right)$$

coef es el coeficiente para pasar del valor actual a cuotas iguales a lo largo del plazo de amortización, con la tasa de interés utilizada. En este caso $coef = 21,48$. La constante 0,012 corresponde a los gastos asumidos de mantenimiento y administración. Finalmente este costo se divide por el volumen correspondiente, con lo cual se tiene el costo unitario.

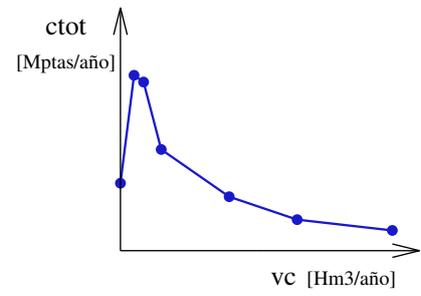
3. Para cada punto se calcula el costo total (C_{tot}), sumando al costo anterior el costo energético, que el PHN lo asume fijo en cada conducción.

Con los valores del eje x (volumen):

1. Se parte del caudal en m^3/s , este valor se multiplica por el coeficiente de flujo del tramo y se convierten las unidades a $hm^3/año$.

Las curvas de costos totales así halladas deberían tener el aspecto de la curva de la derecha. Entre los puntos especificados, la forma de la curva responde a una parábola de ecuación: $ctot = a \cdot vc^2 + b \cdot vc + c$

Decimos que las curvas deberían tener este aspecto, porque no todas lo tienen. En particular la curva correspondiente al tramo 13 tiene forma de serrucho, lo que ya se verá en el documento principal que ocasiona problemas al momento de optimizar.



Apéndice C: Descripción de los archivos de datos de EcoGes

C.1. Archivo de datos físicos de OptiGes

El archivo `DATGEN.opt` contiene la descripción de todos los elementos que componen el sistema. Es creado por OptiWin, y su estructura puede consultarse en [Andreu, 1992b], aunque a continuación se reproducen las primeras líneas para comodidad del lector.

Un archivo de ejemplo se transcribe en el recuadro siguiente:

```
'V 2.0'  
'Caso I1'  
'Ejemplo de inclusión de acuífero unicelular'  
1 1 1935  
1 0 2 1  
4 1 1 3 3 0
```

La estructura de este archivo es la siguiente:

- La 1ra línea debe contener exactamente el texto del ejemplo.
- La 2da línea contiene el título del caso.
- La 3ra línea contiene el subtítulo
- La 4ta línea contiene 3 datos: la cantidad de años de cada sub-período de optimización, la cantidad de sub-periodos en el horizonte temporal de estudio, y el año inicial.
- La 5ta línea contiene 4 datos, que se utilizan en OptiGes pero no en EcoGes.
- La 6ta línea contiene 6 datos:
 - Número de nudo final del esquema de OptiWin.
 - Cantidad de embalses del esquema.
 - Cantidad de aportaciones del esquema.
 - Cantidad de conducciones del esquema.
 - Cantidad de demandas del esquema.
 - Cantidad de retornos del esquema.
- La 7ma línea contiene 3 datos, que no se utilizan en EcoGes.
- A continuación van el grupo de datos correspondientes a cada embalse, luego los de cada aportación, los de cada conducción, los de cada demanda y finalmente los de cada retorno.

C.2. Archivos de aportaciones de OptiGes

Son los archivos de aportaciones para OptiGes-OptiWin. Debe haber un archivo por cada aportación del esquema, y deben estar ubicados en la carpeta de trabajo.

El archivo tiene las 3 primeras líneas con texto (cualquier texto, pero no vacías), 6 líneas en blanco, 2 líneas con texto (con el nombre de los meses y con una separación), y los valores de las aportaciones en formato matricial (una fila por cada año), tal como muestra el recuadro siguiente:

Archivo de aportaciones													
Caso I1													
Valores en hm3/mes													
A/O	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	TOTAL
1952/53	.39	.94	.62	.43	.44	.25	1.22	.56	.95	.33	.27	.13	6.53
1953/54	.10	.27	.42	.09	.46	.10	1.08	.08	.07	.02	.00	.07	2.76
1954/55	2.0	1.7	.82	.91	.26	.15	1.8	1.08	.72	.32	.5	.17	10.43

C.3. Archivo de datos económicos de los elementos

El archivo de propiedades económicas de los elementos debe llamarse `EcuPrecio.txt` y estar ubicado en la carpeta de trabajo. Un ejemplo de este archivo se presenta en el recuadro siguiente:

Archivo de propiedades económicas de Caso I1													
Cantidad de ecuaciones													
4													
nro	tipo	elem	mes	NroEc	a	b	c	d	e	f	g	$y= a+b \cdot x+c \cdot x^2+f \cdot x^g$	
1	8	1	0	1	90	-5.00	0	0	0	0	0		
2	8	2	0	1	50	-1.00	0	0	0	0	0		
3	8	2	5	1	30	-1.00	0	0	0	0	0		

Observaciones:

- tipo: se refiere al tipo de elemento de los posibles:
 - 1: embalse.

- 2: conducción tipo 1.
 - 7: aportación.
 - 8: demanda.
 - 14: bombeo desde un acuífero a una demanda.
 - 13: retorno.
 - 51: relación volumen-profundidad de los acuíferos.
- **mes:** permite especificar valores distintos de un mes a otro. Cuando *mes* = 0 significa que los valores se aplican a todos los meses. Para cada elemento, el renglón con *mes* ≠ 0 debe figurar después del renglón de *mes* = 0 (ver 3ra línea). El mes= 1 es octubre.

C.4. Archivo de datos adicionales

El archivo de datos adicionales es opcional, pero si existe debe llamarse **DatAdi.txt** y estar ubicado en la carpeta de trabajo. Este archivo contiene los datos de los acuíferos a incorporar al sistema, así como la información de la interacción de éstos con los usos. Un archivo de ejemplo se transcribe en el recuadro siguiente:

```
'V 2.0'
' Caso I1'
'Ejemplo de inclusión de acuífero unicelular'
1 1 1935
1 0 2 1
1 3
'Uso U'
1 1 0 0 0 0 0.000
0.100 0.700
0 0.0 0.0
'Uso A'
1 1 0 0 0 0 0.000
0.200 0.700
0 0.0 0.0
'Uso U2'
1 1 0 0 0 0 0.000
0.300 0.700
0 0.0 0.0
'Unicelular'
2
0 0
.12 10.000
0
```

En la estructura de este archivo se trató de seguir la estructura de los datos de acuíferos en el archivo de datos de SimGes. La estructura de este archivo es la siguiente:

- Los primeros 5 renglones no se usan. Se recomienda que sean iguales al del archivo `DATGEN.opt` que crea `OptiWin` con las características del esquema a modelar, para saber a qué esquema corresponde el archivo adicional si se traslapa.
- 6to renglón: cantidad de acuíferos y cantidad de demandas en este archivo.
- del siguiente renglón en adelante, 4 renglones por **cada demanda**:
 - a: número (de la demanda en el esquema) y nombre de la demanda.
 - b: en un mismo renglón los siguientes datos:
 - número de acuífero que recarga esa demanda,
 - número de acción elemental de dicha recarga,
 - número de acuífero del que se bombea para esa demanda,
 - número de acción elemental de dicho bombeo,
 - número de parámetro de control del bombeo,
 - valor umbral para permitir el bombeo,
 - volumen máximo mensual permitido de bombeo.
 - c: coeficiente de retorno de la demanda, coeficiente de consumo de la demanda.
 - d: columna de datos de la precipitación a aplicar a la demanda, área de referencia de la demanda [Ha], tasa de crecimiento mensual de la demanda.
- del siguiente renglón en adelante: 3 o 5 renglones por **cada acuífero**:
 - a: número del acuífero (en el esquema) y nombre del acuífero.
 - b: tipo de acuífero (con la nomenclatura de `SimGes`). Si el tipo es mayor que 100, los datos del acuífero se leen de un archivo aparte, cuyo nombre se lee del siguiente renglón; si el tipo es menor de 100, los datos del acuífero se leen de los 3 renglones siguientes.
Los datos del acuífero dependen de qué tipo se trate. En nuestro ejemplo:
 - c: parámetro de control del acuífero
 - d: coeficiente de descarga (α), volumen inicial del acuífero
 - e: nudo en el que descarga el acuífero

C.5. Archivo de precipitaciones

El archivo de precipitaciones es opcional, pero si existe debe estar ubicado en la carpeta de trabajo y llamarse `DatPrecipita.txt`. Éste contiene en columnas los datos de precipitación para cada zona de la cuenca, a los efectos de descontar de la demanda agrícola el aporte natural por precipitación. Los datos de este archivo deben comenzar el mismo año y mes que los archivos de aportaciones en ríos.

Un archivo de ejemplo de precipitaciones se transcribe en el recuadro siguiente:

```
PRECIPITACIONES [mm]
MODELACIÓN SISTEMA 4AcuiAV
Abastecimiento complementario de demandas
3
AÑO MES Alarcón Molinar Contreras
1940 10 22.8 26.15 25.57
1940 11 45.6 16.29 29.57
1940 12 31.4 29.69 37.24
.....
```

En la estructura de este archivo es la siguiente:

- Las 3 primeras líneas (que deben contener algún caracter) son para describir el contenido del archivo.
- La 4ta línea contiene la cantidad de columnas de datos en el archivo.
- La 5ta línea describe el contenido de cada columna.
- La 6ta línea y las siguientes contienen la precipitación representativa en [mm].

Apéndice D: Archivo de datos económicos del caso Júcar para EcoGes

Caso Júcar - OPTIMIZACION (curvas mensuales)

Cantidad de ecuaciones $y = a + b x + c x^2 + d / (x + e) + f x^g$
182

nro	tipo	elem	mes	NroEc	a	b	c	d	e	f	g	Elemento
1	8	8	0	1	6.00	-0.7600	0	0	0	0	0	Ab. Valencia 1-8
2	8	8	9	1	6.00	-0.7510	0	0	0	0	0	Ab. Valencia 9
3	8	8	10	1	6.00	-0.7510	0	0	0	0	0	Ab. Valencia 10
4	8	8	11	1	6.00	-0.7510	0	0	0	0	0	Ab. Valencia 11
5	8	8	12	1	6.00	-0.7512	0	0	0	0	0	Ab. Valencia 12
6	8	9	0	1	6.00	-6.0241	0	0	0	0	0	Ab. Sagunto 1-8
7	8	9	9	1	6.00	-5.9524	0	0	0	0	0	Ab. Sagunto 9
8	8	9	10	1	6.00	-5.9524	0	0	0	0	0	Ab. Sagunto 10
9	8	9	11	1	6.00	-5.9524	0	0	0	0	0	Ab. Sagunto 11
10	8	9	12	1	6.00	-5.9524	0	0	0	0	0	Ab. Sagunto 12
11	8	10	0	1	6.00	-4.0157	0	0	0	0	0	Ab. Albacete 1-8
12	8	10	9	1	6.00	-3.9679	0	0	0	0	0	Ab. Albacete 9
13	8	10	10	1	6.00	-3.9679	0	0	0	0	0	Ab. Albacete 10
14	8	10	11	1	6.00	-3.9679	0	0	0	0	0	Ab. Albacete 11
15	8	10	12	1	6.00	-3.9679	0	0	0	0	0	Ab. Albacete 12
16	8	11	0	1	7.80	-7.9268	0	0	0	0	0	Ab. Marina Baja 0
17	8	11	2	1	7.80	-8.9041	0	0	0	0	0	Ab. Marina Baja 2
18	8	11	3	1	7.80	-9.5588	0	0	0	0	0	Ab. Marina Baja 3
19	8	11	4	1	7.80	-9.5588	0	0	0	0	0	Ab. Marina Baja 4
20	8	11	5	1	7.80	-9.8485	0	0	0	0	0	Ab. Marina Baja 5
21	8	11	6	1	7.80	-7.5581	0	0	0	0	0	Ab. Marina Baja 6
22	8	11	7	1	7.80	-7.9268	0	0	0	0	0	Ab. Marina Baja 7
23	8	11	8	1	7.80	-8.2278	0	0	0	0	0	Ab. Marina Baja 8
24	8	11	9	1	7.80	-7.3864	0	0	0	0	0	Ab. Marina Baja 9
25	8	11	10	1	7.80	-6.1321	0	0	0	0	0	Ab. Marina Baja 10
26	8	11	11	1	7.80	-5.7522	0	0	0	0	0	Ab. Marina Baja 11
27	8	11	12	1	7.80	-7.3034	0	0	0	0	0	Ab. Marina Baja 12
28	8	7	0	1	1.00	-0.1000	0	0	0	0	0	Citrico-Canal J-T 1
29	8	7	2	1	1.00	-0.5000	0	0	0	0	0	Citrico-Canal J-T 2
30	8	7	3	1	1.00	-1.0000	0	0	0	0	0	Citrico-Canal J-T 3
31	8	7	4	1	0.00	0.0000	0	0	0	0	0	Citrico-Canal J-T 4
32	8	7	5	1	0.00	0.0000	0	0	0	0	0	Citrico-Canal J-T 5
33	8	7	6	1	0.00	0.0000	0	0	0	0	0	Citrico-Canal J-T 6
34	8	7	7	1	1.00	-0.2000	0	0	0	0	0	Citrico-Canal J-T 7
35	8	7	8	1	1.00	-0.1250	0	0	0	0	0	Citrico-Canal J-T 8
36	8	7	9	1	1.00	-0.0625	0	0	0	0	0	Citrico-Canal J-T 9
37	8	7	10	1	1.00	-0.0476	0	0	0	0	0	Citrico-Canal J-T 10
38	8	7	11	1	1.00	-0.0476	0	0	0	0	0	Citrico-Canal J-T 11
39	8	7	12	1	1.00	-0.0625	0	0	0	0	0	Citrico-Canal J-T 12
40	8	2	0	1	1.00	-0.0335	0	0	0	0	0	Citrico-Acequia Real 1
41	8	2	2	1	1.00	-0.0632	0	0	0	0	0	Citrico-Acequia Real 2
42	8	2	3	1	1.00	-0.2629	0	0	0	0	0	Citrico-Acequia Real 3
43	8	2	4	1	1.00	-0.1620	0	0	0	0	0	Citrico-Acequia Real 4
44	8	2	5	1	1.00	-0.0545	0	0	0	0	0	Citrico-Acequia Real 5
45	8	2	6	1	1.00	-0.0353	0	0	0	0	0	Citrico-Acequia Real 6
46	8	2	7	1	1.00	-0.0286	0	0	0	0	0	Citrico-Acequia Real 7
47	8	2	8	1	1.00	-0.0233	0	0	0	0	0	Citrico-Acequia Real 8
48	8	2	9	1	1.00	-0.0201	0	0	0	0	0	Citrico-Acequia Real 9
49	8	2	10	1	1.00	-0.0149	0	0	0	0	0	Citrico-Acequia Real 10
50	8	2	11	1	1.00	-0.0163	0	0	0	0	0	Citrico-Acequia Real 11
51	8	2	12	1	1.00	-0.0241	0	0	0	0	0	Citrico-Acequia Real 12
52	8	4	0	1	1.00	-0.3367	0	0	0	0	0	Citrico-Sueca 1
53	8	4	2	1	1.00	-0.9268	0	0	0	0	0	Citrico-Sueca 2
54	8	4	3	1	1.00	-1.2715	0	0	0	0	0	Citrico-Sueca 3
55	8	4	4	1	1.00	-2.5381	0	0	0	0	0	Citrico-Sueca 4
56	8	4	5	1	1.00	-1.0246	0	0	0	0	0	Citrico-Sueca 5

57	8	4	6	1	1.00	-0.4421	0	0	0	0	0	Cítrico-Sueca 6
58	8	4	7	1	1.00	-0.3486	0	0	0	0	0	Cítrico-Sueca 7
59	8	4	8	1	1.00	-0.1811	0	0	0	0	0	Cítrico-Sueca 8
60	8	4	9	1	1.00	-0.1201	0	0	0	0	0	Cítrico-Sueca 9
61	8	4	10	1	1.00	-0.0948	0	0	0	0	0	Cítrico-Sueca 10
62	8	4	11	1	1.00	-0.1102	0	0	0	0	0	Cítrico-Sueca 11
63	8	4	12	1	1.00	-0.1926	0	0	0	0	0	Cítrico-Sueca 12
64	8	6	0	1	1.00	-0.6971	0	0	0	0	0	Cítrico-Cullera 1
65	8	6	2	1	1.00	-1.9891	0	0	0	0	0	Cítrico-Cullera 2
66	8	6	3	1	1.00	-2.8110	0	0	0	0	0	Cítrico-Cullera 3
67	8	6	4	1	1.00	-5.9701	0	0	0	0	0	Cítrico-Cullera 4
68	8	6	5	1	1.00	-2.2321	0	0	0	0	0	Cítrico-Cullera 5
69	8	6	6	1	1.00	-0.9206	0	0	0	0	0	Cítrico-Cullera 6
70	8	6	7	1	1.00	-0.7227	0	0	0	0	0	Cítrico-Cullera 7
71	8	6	8	1	1.00	-0.3701	0	0	0	0	0	Cítrico-Cullera 8
72	8	6	9	1	1.00	-0.2372	0	0	0	0	0	Cítrico-Cullera 9
73	8	6	10	1	1.00	-0.1847	0	0	0	0	0	Cítrico-Cullera 10
74	8	6	11	1	1.00	-0.2172	0	0	0	0	0	Cítrico-Cullera 11
75	8	6	12	1	1.00	-0.3720	0	0	0	0	0	Cítrico-Cullera 12
76	8	5	0	1	1.00	-1.8543	0	0	0	0	0	Cítrico-Cuatro Pueblos 0
77	8	5	2	1	1.00	-5.1115	0	0	0	0	0	Cítrico-Cuatro Pueblos 2
78	8	5	3	1	1.00	-6.9841	0	0	0	0	0	Cítrico-Cuatro Pueblos 3
79	8	5	4	1	1.00	-13.9771	0	0	0	0	0	Cítrico-Cuatro Pueblos 4
80	8	5	5	1	1.00	-5.6643	0	0	0	0	0	Cítrico-Cuatro Pueblos 5
81	8	5	6	1	1.00	-2.4369	0	0	0	0	0	Cítrico-Cuatro Pueblos 6
82	8	5	7	1	1.00	-1.9224	0	0	0	0	0	Cítrico-Cuatro Pueblos 7
83	8	5	8	1	1.00	-0.9955	0	0	0	0	0	Cítrico-Cuatro Pueblos 8
84	8	5	9	1	1.00	-0.6600	0	0	0	0	0	Cítrico-Cuatro Pueblos 9
85	8	5	10	1	1.00	-0.5206	0	0	0	0	0	Cítrico-Cuatro Pueblos 10
86	8	5	11	1	1.00	-0.6056	0	0	0	0	0	Cítrico-Cuatro Pueblos 11
87	8	5	12	1	1.00	-1.0611	0	0	0	0	0	Cítrico-Cuatro Pueblos 12
88	8	3	0	1	1.00	-0.1071	0	0	0	0	0	Cítrico-Escalona 1
89	8	3	2	1	1.00	-0.1250	0	0	0	0	0	Cítrico-Escalona 2
90	8	3	3	1	1.00	-0.3750	0	0	0	0	0	Cítrico-Escalona 3
91	8	3	4	1	1.00	-0.2500	0	0	0	0	0	Cítrico-Escalona 4
92	8	3	5	1	1.00	-0.1875	0	0	0	0	0	Cítrico-Escalona 5
93	8	3	6	1	1.00	-0.2500	0	0	0	0	0	Cítrico-Escalona 6
94	8	3	7	1	1.00	-0.0938	0	0	0	0	0	Cítrico-Escalona 7
95	8	3	8	1	1.00	-0.0682	0	0	0	0	0	Cítrico-Escalona 8
96	8	3	9	1	1.00	-0.0469	0	0	0	0	0	Cítrico-Escalona 9
97	8	3	10	1	1.00	-0.0441	0	0	0	0	0	Cítrico-Escalona 10
98	8	3	11	1	1.00	-0.0500	0	0	0	0	0	Cítrico-Escalona 11
99	8	3	12	1	1.00	-0.0938	0	0	0	0	0	Cítrico-Escalona 12
100	8	17	0	1	0.05	-0.0047	0	0	0	0	0	Arroz-Acequia Real 1
101	8	17	2	1	0.05	-0.0031	0	0	0	0	0	Arroz-Acequia Real 2
102	8	17	3	1	0.05	-0.0098	0	0	0	0	0	Arroz-Acequia Real 3
103	8	17	4	1	0.05	-0.0045	0	0	0	0	0	Arroz-Acequia Real 4
104	8	17	5	1	0.05	-0.0073	0	0	0	0	0	Arroz-Acequia Real 5
105	8	17	6	1	0.05	-0.0064	0	0	0	0	0	Arroz-Acequia Real 6
106	8	17	7	1	0.05	-0.0045	0	0	0	0	0	Arroz-Acequia Real 7
107	8	17	8	1	0.05	-0.0029	0	0	0	0	0	Arroz-Acequia Real 8
108	8	17	9	1	0.05	-0.0056	0	0	0	0	0	Arroz-Acequia Real 9
109	8	17	10	1	0.05	-0.0057	0	0	0	0	0	Arroz-Acequia Real 10
110	8	17	11	1	0.05	-0.0058	0	0	0	0	0	Arroz-Acequia Real 11
111	8	17	12	1	0.05	-0.0176	0	0	0	0	0	Arroz-Acequia Real 12
112	8	14	0	1	0.05	-0.0039	0	0	0	0	0	Arroz-Sueca 1
113	8	14	2	1	0.05	-0.0037	0	0	0	0	0	Arroz-Sueca 2
114	8	14	3	1	0.05	-0.0036	0	0	0	0	0	Arroz-Sueca 3
115	8	14	4	1	0.05	-0.0048	0	0	0	0	0	Arroz-Sueca 4
116	8	14	5	1	0.05	-0.0104	0	0	0	0	0	Arroz-Sueca 5
117	8	14	6	1	0.05	-0.0065	0	0	0	0	0	Arroz-Sueca 6
118	8	14	7	1	0.05	-0.0046	0	0	0	0	0	Arroz-Sueca 7
119	8	14	8	1	0.05	-0.0020	0	0	0	0	0	Arroz-Sueca 8
120	8	14	9	1	0.05	-0.0029	0	0	0	0	0	Arroz-Sueca 9
121	8	14	10	1	0.05	-0.0032	0	0	0	0	0	Arroz-Sueca 10
122	8	14	11	1	0.05	-0.0034	0	0	0	0	0	Arroz-Sueca 11
123	8	14	12	1	0.05	-0.0114	0	0	0	0	0	Arroz-Sueca 12
124	8	16	0	1	0.05	-0.0054	0	0	0	0	0	Arroz-Cullera 1
125	8	16	2	1	0.05	-0.0051	0	0	0	0	0	Arroz-Cullera 2
126	8	16	3	1	0.05	-0.0051	0	0	0	0	0	Arroz-Cullera 3
127	8	16	4	1	0.05	-0.0067	0	0	0	0	0	Arroz-Cullera 4
128	8	16	5	1	0.05	-0.0143	0	0	0	0	0	Arroz-Cullera 5
129	8	16	6	1	0.05	-0.0089	0	0	0	0	0	Arroz-Cullera 6
130	8	16	7	1	0.05	-0.0063	0	0	0	0	0	Arroz-Cullera 7
131	8	16	8	1	0.05	-0.0027	0	0	0	0	0	Arroz-Cullera 8
132	8	16	9	1	0.05	-0.0040	0	0	0	0	0	Arroz-Cullera 9
133	8	16	10	1	0.05	-0.0042	0	0	0	0	0	Arroz-Cullera 10
134	8	16	11	1	0.05	-0.0045	0	0	0	0	0	Arroz-Cullera 11
135	8	16	12	1	0.05	-0.0144	0	0	0	0	0	Arroz-Cullera 12
136	8	15	0	1	0.05	-0.0251	0	0	0	0	0	Arroz-4 Pueblos 1
137	8	15	2	1	0.05	-0.0233	0	0	0	0	0	Arroz-4 Pueblos 2
138	8	15	3	1	0.05	-0.0231	0	0	0	0	0	Arroz-4 Pueblos 3
139	8	15	4	1	0.05	-0.0305	0	0	0	0	0	Arroz-4 Pueblos 4
140	8	15	5	1	0.05	-0.0660	0	0	0	0	0	Arroz-4 Pueblos 5
141	8	15	6	1	0.05	-0.0413	0	0	0	0	0	Arroz-4 Pueblos 6
142	8	15	7	1	0.05	-0.0291	0	0	0	0	0	Arroz-4 Pueblos 7

143	8	15	8	1	0.05	-0.0125	0	0	0	0	0	Arroz-4 Pueblos 8
144	8	15	9	1	0.05	-0.0188	0	0	0	0	0	Arroz-4 Pueblos 9
145	8	15	10	1	0.05	-0.0201	0	0	0	0	0	Arroz-4 Pueblos 10
146	8	15	11	1	0.05	-0.0215	0	0	0	0	0	Arroz-4 Pueblos 11
147	8	15	12	1	0.05	-0.0722	0	0	0	0	0	Arroz-4 Pueblos 12
148	8	1	0	1	0.25	0.0000	0	0	0	0	0	Central Nuclear Cofrentes
149	8	13	0	1	0.00	-0.0009	0	0	0	0	0	Zona Albacete
150	8	13	9	1	0.0824	-0.0017	0	0	0	0	0	Zona Albacete 9
151	8	13	10	1	0.0824	-0.0005	0	0	0	0	0	Zona Albacete 10
152	8	13	11	1	0.0824	-0.0005	0	0	0	0	0	Zona Albacete 11
153	8	13	12	1	0.0824	-0.0019	0	0	0	0	0	Zona Albacete 12
154	8	12	0	1	0.0000	0.0000	0	0	0	0	0	Sustitución Mancha
155	8	12	1	1	0.0824	-0.0786	0	0	0	0	0	Sustitución Mancha 1
156	8	12	5	1	0.0824	-0.5500	0	0	0	0	0	Sustitución Mancha 5
157	8	12	6	1	0.0824	-0.1375	0	0	0	0	0	Sustitución Mancha 6
158	8	12	7	1	0.0824	-0.1375	0	0	0	0	0	Sustitución Mancha 7
159	8	12	8	1	0.0824	-0.0917	0	0	0	0	0	Sustitución Mancha 8
160	8	12	9	1	0.0824	-0.0688	0	0	0	0	0	Sustitución Mancha 9
161	8	12	10	1	0.0824	-0.0229	0	0	0	0	0	Sustitución Mancha 10
162	8	12	11	1	0.0824	-0.0190	0	0	0	0	0	Sustitución Mancha 11
163	8	12	12	1	0.0824	-0.0324	0	0	0	0	0	Sustitución Mancha 12
164	2	2	0	1	0.04	-0.0040	10	0	0	0	0	Ambiental-Júcar-1 (mensual)
165	2	2	4	2	0.04	-0.0018	22.2	0	0	0	0	Ambiental-Júcar-1 (mensual)
166	2	2	5	3	0.04	-0.0018	22.2	0	0	0	0	Ambiental-Júcar-1 (mensual)
167	2	2	6	4	0.04	-0.0018	22.2	0	0	0	0	Ambiental-Júcar-1 (mensual)
168	2	2	7	5	0.04	-0.0018	22.2	0	0	0	0	Ambiental-Júcar-1 (mensual)
169	2	24	0	1	0.05	-0.0050	10	0	0	0	0	Ambiental-Cabriel-1 (mensual)
170	2	24	5	2	0.05	-0.0025	20	0	0	0	0	Ambiental-Cabriel-1 (mensual)
171	2	24	6	3	0.05	-0.0025	20	0	0	0	0	Ambiental-Cabriel-1 (mensual)
172	2	5	0	1	0.01	-0.0005	20	0	0	0	0	Ambiental-Júcar-5 (mensual)
173	2	5	4	2	0.01	-0.0003	40	0	0	0	0	Ambiental-Júcar-5 (mensual)
174	2	5	5	3	0.01	-0.0003	40	0	0	0	0	Ambiental-Júcar-5 (mensual)
175	2	5	5	3	0.01	-0.0003	40	0	0	0	0	Ambiental-Júcar-5 (mensual)
176	14	12	0	1	-0.03	-0.0003	0	0	0	0	0	Costo bombeo de Acu MO p/uso 12
177	14	13	0	1	-0.03	-0.0003	0	0	0	0	0	Costo bombeo de Acu MO p/uso 13
178	51	3	0	1	26.00	-0.0140	0.0000014	0	0	0	0	2 prof=f(volumen) para Acu MO
179	2	20	0	1	-0.00001	0.0000	0	0	0	0	0	Exced Tous (p/ evitar sueltas)
180	2	15	0	1	-0.00001	-0.000002	0	0	0	0	0	Sal. cauce(p/ evitar sueltas)
181	1	1	0	1	0.03	0	0	0	0	0	0	Emb. Alarcón (p/ evitar sueltas)
182	1	1	12	1	0.03	-0.00003	0	0	0	0	0	Emb. Alarcón (p/ evitar sueltas)

Apéndice E: Descripción de los archivos de datos de MEvalGes

E.1. Archivo de datos físicos de SimGes

El archivo *.fis contiene la descripción de todos los elementos del sistema y de su interrelación. Es creado por SimWin, y su estructura puede consultarse en [Andreu et al., 1992].

E.2. Archivo de aportaciones

Tiene el mismo formato que el archivo de aportaciones para SimGes-SimWin. Debe haber un único archivo de aportaciones ubicado en la carpeta de trabajo, en el que los datos de cada aportación se ubican en una columna. El siguiente recuadro muestra los primeros renglones de un archivo de ejemplo.

```
'APORTACIONES'  
,,  
,,  
1  
'AÑO' 'MES' 'Aportación 1'  
1952 10 39.0  
1952 11 94.0
```

En el 4to renglón se define la cantidad total de columnas de datos que tiene el archivo.

E.3. Archivo de propiedades económicas de los elementos

El archivo de propiedades económicas de los elementos debe llamarse `Ecuaprecio.txt` y estar ubicado en la carpeta de trabajo. Este archivo tiene la misma estructura que el de `EcoGes`, y su descripción puede verse en la sección C.3.

E.4. Archivo con los datos de las modificaciones

Este archivo debe llamarse `DatosValRec.txt` y estar ubicado en la carpeta de trabajo. Contiene la información acerca del caso modificado, y lo crea Gestal, por lo que el usuario no debe preocuparse de su estructura. Igualmente se describe a título informativo.

En el recuadro siguiente se transcribe a modo de ejemplo el archivo del Caso L1eva:

```
Datos para EvalGes+SimGes, Caso L1eva
=====

Clase de cálculo a realizar:
2

Cantidad de elementos en los que se realiza la modificación:
1

Valor de la detracción (Delta, en Hm3):
-2.0

Numeros de los elementos en los que se realiza la modificación:
1
```

Los valores que se leen son los numéricos, mientras que los textos solo hacen comprensible el contenido. Debe respetarse la presencia o ausencia de texto en las distintas líneas.

- Clase de cálculo a realizar puede tomar uno de los siguientes valores:

MODIFICACIONES EN UN ÚNICO MES

- 0: valor del recurso en un nudo.
- 1: costo marginal de una restricción de caudal mínimo en una conducción.
- 2: costo marginal de una restricción de volumen mínimo en un embalse.
- 3: costo marginal de una restricción de volumen requerido por un uso (demanda).
- 4: costo marginal de una restricción de volumen máximo en un embalse.

MODIFICACIONES EN EL MISMO MES TODOS LOS AÑOS

- 10: valor del recurso en un nudo .
- 11: costo marginal de una restricción de caudal mínimo en una conducción.
- 12: costo marginal de una restricción de volumen mínimo en un embalse.
- 13: costo marginal de una restricción de volumen requerido por un uso (demanda).
- 14: costo marginal de una restricción de volumen máximo en un embalse.

Evidentemente sólo se puede realizar una clase de cálculo a la vez.

- Cantidad de elementos en los que se realiza la modificación (nE): el caso modificado se resolverá en cada mes tantas veces como elementos a modificar se indiquen.
- Valor de la detracción (Δ): es valor se resta al valor de los elementos en el caso modificado respecto al caso base.
- Números de los elementos en los que se realiza la modificación: son nE valores con los números del esquema de SimWin a los que se aplica la modificación. Según la clase de cálculo a realizar se tratará de nudos, embalses, conducciones, etc.

Apéndice F: Archivo de datos económicos del caso Júcar para MEvalGes

Caso Júcar - SIMULACION (curvas anuales)

Cantidad de ecuaciones
25

$$y = a + b x + c x^2 + d / (x + e) + f x^g$$

nro	tipo	elem	mes	a	b	c	d	e	f	g	Elemento
1	8	8	-1	6.00	-0.0631	0	0	0	0	0	Ab. Valencia
2	8	9	-1	6.00	-0.5000	0	0	0	0	0	Ab. Sagunto
3	8	10	-1	6.00	-0.3333	0	0	0	0	0	Ab. Albacete
4	8	11	-1	7.80	-0.6500	0	0	0	0	0	Ab. Marina Baja
5	9	1	-1	0.00192	0	0	0	0	0	0	Central Cofrentes
6	9	2	-1	0.00192	0	0	0	0	0	0	Central Cortes II
7	9	3	-1	0.00192	0	0	0	0	0	0	Central Millares
8	8	7	-1	1.00	-0.0100	0	0	0	0	0	Cítrico-Canal J-T
9	8	2	-1	1.00	-0.0030	0	0	0	0	0	Cítrico-Acequia Real
10	8	4	-1	1.00	-0.0200	0	0	0	0	0	Cítrico-Sueca
11	8	6	-1	1.00	-0.0400	0	0	0	0	0	Cítrico-Cullera
12	8	5	-1	1.00	-0.1100	0	0	0	0	0	Cítrico-Cuatro Pueblos
13	8	3	-1	1.00	-0.0080	0	0	0	0	0	Cítrico-Escalona
14	8	15	-1	0.05	-0.00167	0	0	0	0	0	Arroz-Acequia Real
15	8	16	-1	0.05	-0.00034	0	0	0	0	0	Arroz-Sueca
16	8	17	-1	0.05	-0.00045	0	0	0	0	0	Arroz-Cullera
17	8	18	-1	0.05	-0.00300	0	0	0	0	0	Arroz-4 Pueblos
18	8	13	-1	0.028	0	2.6E-07	4.5	8	0	0	Zona Albacete
19	2	2	-1	-0.05	0.00000	0	7	1.5	0	0	Ambiental-Júcar-1
20	4	2	-1	-0.05	0.00000	0	5	1.2	0	0	Ambiental-Cabriel-1
21	2	5	-1	-0.04	-0.00036	0	2.2	0.5	0	0	Ambiental-Júcar-5
22	2	12	-1	0	0	0	0	0	0	0	Ambiental-Salida Tous
23	8	1	-1	0.032	0	0	0	0	0	0	Central Nuclear Cofrentes
24	14	13	0	0.2	0.0039	0	0	0	0	0	bombeo Mancha Oriental
25	51	3	0	26.0	-0.014	1.4E-06	0	0	1	1	ecuación p-V del acuif. Mancha Oriental

Apéndice G: Eco de datos del caso Júcar en SimGes

* Simulación Serie Histrica Final

Fecha y hora: 28/ 9/2004 10:31:59

NO. DE ADS: 61 AG INICIAL: 1940
ECO DE DATOS: 1 ESCRITURA RESUMIDA: 161(61) SALIDA GRAFICOS: 61 SALIDA BALANCES: 0 SALIDA F. OBJ.: 0(0)

HIPOTESIS: Periodo 1940 A 2001

NO. DE NUDOS SISTEMA FISICO: 42
NO. DE EMBALSES: 7
NO. DE TRAMOS DE RIO TIPO 1: 37
NO. DE TRAMOS DE RIO TIPO 2: 4
NO. DE TRAMOS DE RIO TIPO 3: 5
NO. DE CONDUCCIONES TIPO 4: 0
NO. DE CONDUCCIONES TIPO 5: 0
NO. DE APORTACIONES INTERMEDIAS: 8
NO. DE DEMANDAS CONSUNTIVAS: 24
NO. DE DEMANDAS NO CONSUNTIVAS: 3
NO. INSTALACIONES RECARGA ARTIFICIAL: 0
NO. ACUIFEROS: 5
NO. BOMBEO ADICIONALES: 1
NO. RETORNOS: 4
NO. GRUPOS ISOPRIORITARIOS: 8
NO. INDICADORES DE RESTRICCION: 6

EMBALSES

* 1-Embi-Alarcon

NUDO 2 NUDO VERTIDOS 2
PRIORIDAD 1
COEF. FORMULA INFILTRACION: A= 0.0000E+00 B= 0.0000E+00 C= 0.0000E+00
ACUIFERO 0 NO. ACCION ELEM. 0
VOL. INICIAL: 500.000 MAX. SUELTAS CONTROLADAS: 500.000

	0	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
VOL MAX	1112.000	1112.000	1112.000	1112.000	1112.000	1112.000	1112.000	1112.000	1112.000	1112.000	1112.000	1112.000
VOL OBJ	900.000	900.000	900.000	900.000	900.000	900.000	900.000	900.000	900.000	900.000	900.000	900.000
VOL MIN	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000
EVAP(mm)	83.900	42.200	22.900	30.400	40.000	93.900	99.200	142.200	209.500	261.700	237.900	154.000

TABLA COTA-SUPERFICIE-VOLUMEN

	0	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
COT(m)	752.000	784.240	788.880	792.470	795.450	798.010	800.200	802.290	804.130	806.000		
SUP(Ha)	0.100	2172.570	2855.810	3467.280	4030.370	4557.690	5057.010	5533.540	5991.020	6479.440		
VOL(Hm3)	0.100	220.000	330.000	440.000	550.000	660.000	770.000	880.000	990.000	1112.000		

* 2-Emb-Molinar

NUDO 6 NUDO VERTIDOS 6
PRIORIDAD 4
COEF. FORMULA INFILTRACION: A= 0.0000E+00 B= 0.0000E+00 C= 0.0000E+00
ACUIFERO 0 NO. ACCION ELEM. 0
VOL. INICIAL: 4.300 MAX. SUELTAS CONTROLADAS: 500.000

	0	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
VOL MAX	4.300	4.300	4.300	4.300	4.300	4.300	4.300	4.300	4.300	4.300	4.300	4.300
VOL OBJ	4.300	4.300	4.300	4.300	4.300	4.300	4.300	4.300	4.300	4.300	4.300	4.300
VOL MIN	4.300	4.300	4.300	4.300	4.300	4.300	4.300	4.300	4.300	4.300	4.300	4.300
EVAP(mm)	14.430	8.658	8.658	10.101	11.544	15.873	21.645	33.189	33.189	33.189	37.518	28.860

TABLA COTA-SUPERFICIE-VOLUMEN

	0	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
COT(m)	462.000	469.700	470.400	471.400	471.800	472.500	473.200	473.900	474.600	476.000		

SUP(Ha)	0.100	60.930	61.860	62.790	63.720	64.650	65.580	66.510	67.440	69.300
VOL(Hm3)	0.100	3.634	3.708	3.782	3.856	3.930	4.004	4.078	4.152	4.300

* 3-Emb3-Contreras

NUDO 9 NUDO VERTIDOS 9
 PRIORIDAD 1
 COEF. FORMULA INFILTRACION: A= 0.3000E+01 B= 0.8000E-04 C= 0.1950E+01
 ACUIFERO 1 NO. ACCION ELEM. 1
 VOL. INICIAL: 150.000 MAX. SUELTAS CONTROLADAS: 500.000

	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
VOL MAX	463.220	463.220	463.220	463.220	463.220	463.220	463.220	463.220	463.220	463.220	463.220	463.220
VOL OBJ	240.000	240.000	240.000	240.000	240.000	240.000	240.000	240.000	240.000	240.000	240.000	240.000
VOL MIN	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000
EVAP(mm)	100.000	55.000	40.000	40.000	50.000	105.000	110.000	150.000	200.000	240.000	215.000	150.000

TABLA COTA-SUPERFICIE-VOLUMEN

COT(m)	565.000	629.440	637.840	644.660	650.260	655.040	659.270	663.100	666.260	668.990
SUP(Ha)	0.100	944.360	1227.330	1478.160	1707.510	1921.090	2122.370	2313.700	2476.770	2622.530
VOL(Hm3)	0.100	180.000	270.000	360.000	450.000	540.000	630.000	720.000	800.000	874.000

* 4-Cortes

NUDO 12 NUDO VERTIDOS 12
 PRIORIDAD 4
 COEF. FORMULA INFILTRACION: A= 0.0000E+00 B= 0.0000E+00 C= 0.0000E+00
 ACUIFERO 0 NO. ACCION ELEM. 0
 VOL. INICIAL: 110.000 MAX. SUELTAS CONTROLADAS: 500.000

	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
VOL MAX	111.000	111.000	111.000	111.000	111.000	111.000	111.000	111.000	111.000	111.000	111.000	111.000
VOL OBJ	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
VOL MIN	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
EVAP(mm)	100.000	57.000	60.000	68.000	76.000	107.000	154.000	227.000	230.000	233.000	258.000	200.000

TABLA COTA-SUPERFICIE-VOLUMEN

COT(m)	220.000	314.420	316.260	318.050	319.740	321.300	322.580	323.650	324.640	325.720
SUP(Ha)	0.100	133.570	200.360	267.140	333.930	400.710	467.500	534.290	601.070	680.000
VOL(Hm3)	0.100	71.000	76.500	82.000	87.500	93.000	98.500	104.000	109.500	116.000

* 5-Naranjero

NUDO 13 NUDO VERTIDOS 13
 PRIORIDAD 4
 COEF. FORMULA INFILTRACION: A= 0.0000E+00 B= 0.0000E+00 C= 0.0000E+00
 ACUIFERO 0 NO. ACCION ELEM. 0
 VOL. INICIAL: 20.000 MAX. SUELTAS CONTROLADAS: 500.000

	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
VOL MAX	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000
VOL OBJ	18.000	18.000	18.000	18.000	18.000	18.000	18.000	18.000	18.000	18.000	18.000	18.000
VOL MIN	18.000	18.000	18.000	18.000	18.000	18.000	18.000	18.000	18.000	18.000	18.000	18.000
EVAP(mm)	100.000	57.000	60.000	68.000	76.000	107.000	154.000	227.000	230.000	233.000	258.000	200.000

TABLA COTA-SUPERFICIE-VOLUMEN

COT(m)	163.000	235.310	236.250	237.170	238.060	238.930	239.790	240.650	241.510	242.370
SUP(Ha)	0.100	25.000	37.500	50.000	62.500	75.000	87.500	100.000	112.500	125.000
VOL(Hm3)	0.100	21.000	22.000	23.000	24.000	25.000	26.000	27.000	28.000	29.000

* 6-Emb6-Tous

NUDO 14 NUDO VERTIDOS 14
 PRIORIDAD 4
 COEF. FORMULA INFILTRACION: A= 0.0000E+00 B= 0.6500E-01 C= 0.8000E+00
 ACUIFERO 0 NO. ACCION ELEM. 0
 VOL. INICIAL: 44.300 MAX. SUELTAS CONTROLADAS: 500.000

	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
VOL MAX	72.400	72.400	378.600	378.600	378.600	378.600	378.600	378.600	378.600	195.000	72.400	72.400
VOL OBJ	60.000	60.000	160.000	160.000	160.000	160.000	160.000	160.000	160.000	140.000	60.000	60.000
VOL MIN	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000
EVAP(mm)	100.000	57.000	60.000	68.000	76.000	107.000	154.000	227.000	230.000	233.000	258.000	200.000

TABLA COTA-SUPERFICIE-VOLUMEN

COT(m)	52.000	98.890	105.210	115.230	120.030	128.220	135.590	142.310	145.480	148.540
SUP(Ha)	0.100	468.090	566.150	740.190	819.600	967.740	1105.030	1234.060	1296.030	1356.510
VOL(Hm3)	0.100	120.000	160.000	240.000	280.000	360.000	440.000	520.000	560.000	600.000

* 7-Emb-Muela

NUDO 22 NUDO VERTIDOS 22
 PRIORIDAD 4
 COEF. FORMULA INFILTRACION: A= 0.0000E+00 B= 0.0000E+00 C= 0.0000E+00
 ACUIFERO 0 NO. ACCION ELEM. 0

VOL. INICIAL:	20.000	MAX. SUELTAS CONTROLADAS:	500.000										
	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S	
VOL MAX	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	
VOL OBJ	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	
VOL MIN	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	
EVAP(mm)	121.739	69.565	73.043	82.609	92.174	130.435	187.826	276.522	280.000	283.478	313.913	243.478	
TABLA COTA-SUPERFICIE-VOLUMEN													
COT(m)	0.100	19.000	19.000	19.000	19.000	19.000	19.000	19.000	19.000	19.000	19.000	19.000	
SUP(Ha)	0.100	115.000	115.000	115.000	115.000	115.000	115.000	115.000	115.000	115.000	115.000	115.000	
VOL(Hm3)	0.100	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	

CONDUCCIONES

TIPO 1

* 1-Cabecera Jucar	NUDO INIC.	1	NUDO FINAL	2	I. COSTE:	0	COSTE:	0.				
	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
Q MIN	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Q MAX	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000
* 2-Jucar-1	NUDO INIC.	2	NUDO FINAL	3	I. COSTE:	0	COSTE:	0.	PRIORIDAD:	0	UMBRAL DEFICIT	0.0
	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
Q MIN	5.357	5.184	5.357	5.357	4.838	5.357	5.184	5.357	5.184	5.357	5.357	5.184
Q MAX	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000
* 3-Jucar-3	NUDO INIC.	4	NUDO FINAL	5	I. COSTE:	0	COSTE:	0.				
	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
Q MIN	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Q MAX	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000
* 4-Jucar-4	NUDO INIC.	5	NUDO FINAL	6	I. COSTE:	2	COSTE:	2.				
	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
Q MIN	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Q MAX	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000
* 5-Jucar-5	NUDO INIC.	6	NUDO FINAL	7	I. COSTE:	1	COSTE:	0.	PRIORIDAD:	0	UMBRAL DEFICIT	1.0
	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
Q MIN	0.791	0.791	0.791	0.791	0.791	0.791	0.791	0.791	0.791	0.791	0.791	0.791
Q MAX	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000
* 6-Jucar-6	NUDO INIC.	7	NUDO FINAL	12	I. COSTE:	0	COSTE:	0.				
	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
Q MIN	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Q MAX	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000
* 7-Cabecera Cabriel	NUDO INIC.	8	NUDO FINAL	9	I. COSTE:	0	COSTE:	0.				
	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
Q MIN	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Q MAX	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000
* 8-Cabriel-2	NUDO INIC.	10	NUDO FINAL	11	I. COSTE:	0	COSTE:	0.				
	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
Q MIN	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Q MAX	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000
* 9-Cabriel-3	NUDO INIC.	11	NUDO FINAL	12	I. COSTE:	0	COSTE:	0.				
	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
Q MIN	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Q MAX	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000
* 10-Cortes-Naranjero	NUDO INIC.	12	NUDO FINAL	13	I. COSTE:	0	COSTE:	0.				
	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
Q MIN	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Q	MAX	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000
* 11-Jucar-7														
		NUDD INIC.	13	NUDD FINAL	14	I. COSTE:	0	COSTE:	0.	PRIORIDAD:	0	UMBRAL DEFICIT	1.0	
Q	MIN	0	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S	
Q	MAX	1.581	1.581	1.581	1.581	1.581	1.581	1.581	1.581	1.581	1.581	1.581	1.581	1.581
Q	MAX	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000
* 12-Tous Rio														
		NUDD INIC.	14	NUDD FINAL	15	I. COSTE:	1	COSTE:	0.	PRIORIDAD:	0	UMBRAL DEFICIT	1.0	
Q	MIN	0	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S	
Q	MAX	1.610	1.560	1.610	1.610	1.450	1.610	1.560	1.610	1.560	1.610	1.610	1.560	1.560
Q	MAX	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000
* 13-Antella-Sellent														
		NUDD INIC.	15	NUDD FINAL	16	I. COSTE:	0	COSTE:	0.					
Q	MIN	0	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S	
Q	MAX	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Q	MAX	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000
* 14-Sellent-Albaida														
		NUDD INIC.	16	NUDD FINAL	35	I. COSTE:	0	COSTE:	-1.					
Q	MIN	0	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S	
Q	MAX	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Q	MAX	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000
* 15-Albaida-Alzira														
		NUDD INIC.	35	NUDD FINAL	36	I. COSTE:	0	COSTE:	0.					
Q	MIN	0	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S	
Q	MAX	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Q	MAX	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000
* 16-Alzira-Verde														
		NUDD INIC.	36	NUDD FINAL	37	I. COSTE:	0	COSTE:	0.					
Q	MIN	0	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S	
Q	MAX	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Q	MAX	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000
* 17-Verde-Magro														
		NUDD INIC.	37	NUDD FINAL	38	I. COSTE:	0	COSTE:	0.					
Q	MIN	0	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S	
Q	MAX	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Q	MAX	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000
* 18-Magro-AzudSueca														
		NUDD INIC.	38	NUDD FINAL	17	I. COSTE:	0	COSTE:	0.					
Q	MIN	0	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S	
Q	MAX	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Q	MAX	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000
* 19-AzudSueca-AzudCullera														
		NUDD INIC.	17	NUDD FINAL	18	I. COSTE:	0	COSTE:	0.					
Q	MIN	0	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S	
Q	MAX	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Q	MAX	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000
* 20-AzudCullera-AzudMarquesa														
		NUDD INIC.	18	NUDD FINAL	19	I. COSTE:	0	COSTE:	0.					
Q	MIN	0	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S	
Q	MAX	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Q	MAX	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000
* 21-Salidas Totales Mar														
		NUDD INIC.	19	NUDD FINAL	0	I. COSTE:	0	COSTE:	0.	PRIORIDAD:	0	UMBRAL DEFICIT	1.0	
Q	MIN	0	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S	
Q	MAX	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Q	MAX	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000
* 22-Canal ATS														
		NUDD INIC.	2	NUDD FINAL	20	I. COSTE:	0	COSTE:	0.					
Q	MIN	0	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S	
Q	MAX	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Q	MAX	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000
* 23-Cortes-Muela														
		NUDD INIC.	12	NUDD FINAL	22	I. COSTE:	0	COSTE:	0.					
Q	MIN	0	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S	
Q	MAX	0	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S	

Q	MIN	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Q	MAX	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000
* 24-Trasvase Vinalop y MB		NUDDO INIC.		12	NUDDO FINAL		21	I. COSTE: 0		COSTE: 0.				
Q	MIN	0	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S	
Q	MAX	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000
* 25-Ret Escalona y Carcagente		NUDDO INIC.		25	NUDDO FINAL		33	I. COSTE: 0		COSTE: -1.		PRIORIDAD: 0		UMBRAL DEFICIT 1.0
Q	MIN	0	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S	
Q	MAX	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000
* 26-Retorno 4Pueblos		NUDDO INIC.		26	NUDDO FINAL		18	I. COSTE: 0		COSTE: 0.				
Q	MIN	0	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S	
Q	MAX	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000
* 27-BombázqReal		NUDDO INIC.		31	NUDDO FINAL		32	I. COSTE: 0		COSTE: 0.		PRIORIDAD: 0		UMBRAL DEFICIT 1.0
Q	MIN	0	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S	
Q	MAX	1.810	0.810	1.170	0.640	0.950	1.800	1.740	1.890	2.100	2.160	2.070	1.970	
* 28-C-Picticia		NUDDO INIC.		22	NUDDO FINAL		13	I. COSTE: 0		COSTE: 0.				
Q	MIN	0	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S	
Q	MAX	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
* 29-C1-29		NUDDO INIC.		27	NUDDO FINAL		28	I. COSTE: 0		COSTE: -1.		PRIORIDAD: 0		UMBRAL DEFICIT 1.0
Q	MIN	0	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S	
Q	MAX	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000
* 30-C1-30		NUDDO INIC.		33	NUDDO FINAL		16	I. COSTE: 0		COSTE: -1.				
Q	MIN	0	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S	
Q	MAX	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000
* 31-C1-31		NUDDO INIC.		34	NUDDO FINAL		35	I. COSTE: 0		COSTE: -1.				
Q	MIN	0	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S	
Q	MAX	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000
* 32-C1-32		NUDDO INIC.		39	NUDDO FINAL		37	I. COSTE: 0		COSTE: -1.				
Q	MIN	0	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S	
Q	MAX	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000
* 33-C1-33		NUDDO INIC.		40	NUDDO FINAL		38	I. COSTE: 0		COSTE: -1.				
Q	MIN	0	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S	
Q	MAX	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000
* 34-Vertidos_Tous_Mar		NUDDO INIC.		14	NUDDO FINAL		19	I. COSTE: 0		COSTE: 0.				
Q	MIN	0	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S	
Q	MAX	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000
* 35-Ac Real-1		NUDDO INIC.		15	NUDDO FINAL		41	I. COSTE: 0		COSTE: -1.				
Q	MIN	0	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S	
Q	MAX	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000
* 36-Ac Real-2		NUDDO INIC.		41	NUDDO FINAL		42	I. COSTE: 0		COSTE: -1.				

	Q	MIN	0	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
Q MIN	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Q MAX	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000

* 37-Ac Real-Albufera NUDO INIC. 42 NUDO FINAL 30 I. COSTE: 0 COSTE: 0.
VOL. MAX. ANUAL: 0.010

	Q	MIN	0	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
Q MIN	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Q MAX	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

TIPO 2

* 1-Canal J.T.1 NUDO INIC. 14 NUDO FINAL 23
Q MIN 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
Q MAX 82.940 82.940 82.940 82.940 82.940 82.940 82.940 82.940 82.940 82.940 82.940 82.940 82.940 82.940
CDF. FORMULA INFILTRACION: A= 0.0000E+00 B= 0.0000E+00 C= 0.1000E+01
ACUIFERO 0 NO. ACCION ELEM. 0

* 2-Canal J.T. 2 NUDO INIC. 23 NUDO FINAL 24
Q MIN 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
Q MAX 82.940 82.940 82.940 82.940 82.940 82.940 82.940 82.940 82.940 82.940 82.940 82.940 82.940 82.940
CDF. FORMULA INFILTRACION: A= 0.0000E+00 B= 0.0000E+00 C= 0.1000E+01
ACUIFERO 0 NO. ACCION ELEM. 0

* 3-C2-3 NUDO INIC. 28 NUDO FINAL 39
Q MIN 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
Q MAX 1000.000 1000.000 1000.000 1000.000 1000.000 1000.000 1000.000 1000.000 1000.000 1000.000 1000.000 1000.000 1000.000 1000.000
CDF. FORMULA INFILTRACION: A= 0.0000E+00 B= 0.4500E+00 C= 0.1000E+01
ACUIFERO 5 NO. ACCION ELEM. 1

* 4-C2-4 NUDO INIC. 29 NUDO FINAL 40
Q MIN 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
Q MAX 1000.000 1000.000 1000.000 1000.000 1000.000 1000.000 1000.000 1000.000 1000.000 1000.000 1000.000 1000.000 1000.000 1000.000
CDF. FORMULA INFILTRACION: A= 0.0000E+00 B= 0.4500E+00 C= 0.1000E+01
ACUIFERO 5 NO. ACCION ELEM. 1

TIPO 3

* 1-Conexin Jfcar-Mancha NUDO INIC. 3 NUDO FINAL 4
Q MIN 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
Q MAX 10000.000 10000.000 10000.000 10000.000 10000.000 10000.000 10000.000 10000.000 10000.000 10000.000 10000.000 10000.000 10000.000 10000.000
NO. ACUIFERO 3 NO. PARAM. CONTROL 2 ACCION ELEM. 0

* 2-Cabriel-1 NUDO INIC. 9 NUDO FINAL 10 PRIORIDAD: 0 UMBRAL DEFICIT: 0.0
Q MIN 1.070 1.040 1.070 1.070 0.970 1.070 1.040 1.070 1.040 1.070 1.040 1.070 1.070 1.040
Q MAX 10000.000 10000.000 10000.000 10000.000 10000.000 10000.000 10000.000 10000.000 10000.000 10000.000 10000.000 10000.000 10000.000 10000.000
NO. ACUIFERO 1 NO. PARAM. CONTROL 2 ACCION ELEM. 1

* 3-Salidas Albufera NUDO INIC. 30 NUDO FINAL 0 PRIORIDAD: 0 UMBRAL DEFICIT: 0.0
Q MIN 3.000 3.000 3.000 3.000 3.000 3.000 3.000 3.000 3.000 3.000 3.000 3.000 3.000 3.000
Q MAX 10000.000 10000.000 10000.000 10000.000 10000.000 10000.000 10000.000 10000.000 10000.000 10000.000 10000.000 10000.000 10000.000 10000.000
NO. ACUIFERO 5 NO. PARAM. CONTROL 2 ACCION ELEM. 1

* 4-C3-4 NUDO INIC. 25 NUDO FINAL 34
Q MIN 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000

Apéndice G: Eco de datos del caso Júcar en SimGes

Q	MAX	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	
NO.	ACUIFERO	2	NO.	PARAM. CONTROL	2	ACCION ELEM.	1													

* 5-C3-5

NUDO INIC. 27 NUDO FINAL 29

	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
Q	MIN	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Q	MAX	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000	10000.000

NO.	ACUIFERO	4	NO.	PARAM. CONTROL	2	ACCION ELEM.	1
-----	----------	---	-----	----------------	---	--------------	---

DEMANDAS CONSUNTIVAS

* 1-C.N. Cofrentes

	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
VOL DEM	2.905	2.905	2.905	2.905	2.905	2.905	2.905	2.905	2.940	2.940	2.940	2.940
ACUIFERO RECARGADO	0		ACCION ELEM.	0								
ACUIFERO BOMBEO	0		ACCION ELEM.	0	Q	MAX BOMBEO	0.000					
PARAM. CONTROL BOMBEO:	0	UMBRAL:	0.0000E+00									
COEF. GARANTIAS:	G. MENS.:	0.0%	CRITERIO TIPO P.H.:	M.:	30.0%	A.:	15.0%					
	CRITERIO TIPO UTAH DWR:	1A:	10.0%	2A:	16.0%	10A:	30.0%					

NO. TOMAS 1

TOMA	NUDO	CUTA	DOT.ANU.	I.R.	ESCO.	CONS.	PRI	RET	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
1-Toma CNC	12	0.0	40.000	0	0.42	0.58	1	1	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000

* 2-Ac Real y Antella

	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
VOL DEM	18.595	9.865	2.371	3.846	11.438	17.678	21.817	26.734	30.941	41.763	38.331	25.909
ACUIFERO RECARGADO	4		ACCION ELEM.	1								
ACUIFERO BOMBEO	0		ACCION ELEM.	0	Q	MAX BOMBEO	0.000					
PARAM. CONTROL BOMBEO:	0	UMBRAL:	0.0000E+00									
COEF. GARANTIAS:	G. MENS.:	0.0%	CRITERIO TIPO P.H.:	M.:	30.0%	A.:	15.0%					
	CRITERIO TIPO UTAH DWR:	1A:	50.0%	2A:	75.0%	10A:	100.0%					

NO. TOMAS 4

TOMA	NUDO	CUTA	DOT.ANU.	I.R.	ESCO.	CONS.	PRI	RET	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
1-Infiltración-1	41	0.0	75.350	0	0.00	0.46	3	0	3.216	0.512	0.733	0.233	0.977	3.728	3.323	10.711	14.341	16.693	14.702	6.154
2-Ret Sup-1	41	0.0	88.050	4	0.61	0.39	4	2	12.162	8.840	0.905	3.380	9.484	10.222	15.171	5.312	0.000	0.000	8.927	13.601
3-Heto-1	41	0.0	86.000	0	0.00	1.00	2	0	3.217	0.513	0.733	0.233	0.977	3.728	3.323	10.711	16.600	25.070	14.702	6.154
4-Toma 4 D-2	32	0.0	100.000	0	0.00	1.00	6	0	19.000	10.000	3.000	4.000	12.000	18.000	22.000	27.000	31.000	42.000	39.000	26.000

* 3-Escalona y Carcagente

	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
VOL DEM	3.780	3.240	1.080	1.620	2.160	1.620	4.320	5.940	8.640	9.180	8.100	4.320
ACUIFERO RECARGADO	2		ACCION ELEM.	1								
ACUIFERO BOMBEO	0		ACCION ELEM.	0	Q	MAX BOMBEO	0.000					
PARAM. CONTROL BOMBEO:	0	UMBRAL:	0.0000E+00									
COEF. GARANTIAS:	G. MENS.:	0.0%	CRITERIO TIPO P.H.:	M.:	30.0%	A.:	15.0%					
	CRITERIO TIPO UTAH DWR:	1A:	50.0%	2A:	75.0%	10A:	100.0%					

NO. TOMAS 3

TOMA	NUDO	CUTA	DOT.ANU.	I.R.	ESCO.	CONS.	PRI	RET	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
1-retornos 2 super	15	0.0	17.000	4	0.35	0.65	4	3	2.130	2.806	0.342	1.332	1.650	0.000	2.686	0.210	1.606	0.000	2.156	2.057
2-infiltracion 2	15	0.0	18.100	0	0.00	0.65	3	0	0.825	0.217	0.369	0.144	0.255	0.880	0.817	2.865	3.517	5.008	2.972	1.132
3-Consumo neto 2	15	0.0	19.100	0	0.00	1.00	2	0	0.825	0.217	0.369	0.144	0.255	0.880	0.817	2.865	3.517	5.008	2.972	1.132

* 4-Sueca

	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
VOL DEM	1.522	0.553	0.403	0.202	0.500	1.159	1.470	2.829	4.268	5.407	4.648	2.660
ACUIFERO RECARGADO	0		ACCION ELEM.	0								
ACUIFERO BOMBEO	0		ACCION ELEM.	0	Q	MAX BOMBEO	0.000					
PARAM. CONTROL BOMBEO:	0	UMBRAL:	0.0000E+00									
COEF. GARANTIAS:	G. MENS.:	0.0%	CRITERIO TIPO P.H.:	M.:	30.0%	A.:	15.0%					
	CRITERIO TIPO UTAH DWR:	1A:	50.0%	2A:	75.0%	10A:	100.0%					

NO. TOMAS 2

TOMA	NUDO	CUTA	DOT.ANU.	I.R.	ESCO.	CONS.	PRI	RET	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
1-CompSueca	17	0.0	0.000	0	0.00	1.00	5	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2-Princ Sueca-Cit	17	0.0	25.650	2	0.00	1.00	4	0	1.522	0.553	0.403	0.202	0.500	1.159	1.470	2.829	4.268	5.407	4.648	2.660

* 5-Cuatro Pueblos

	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
VOL DEM	0.226	0.082	0.060	0.030	0.074	0.172	0.218	0.421	0.635	0.805	0.692	0.395

ACUIFERO RECARGADO 0 ACCION ELEM. 0
 ACUIFERO BOMBEO 0 ACCION ELEM. 0 Q MAX BOMBEO 0.000
 PARAM. CONTROL BOMBEO: 0 UMBRAL:0.0000E+00
 COEF. GARANTIAS: G. MENS.: 0.0% CRITERIO TIPO P.H.: M.: 30.0% A.: 15.0%
 CRITERIO TIPO UTAH DWR: 1A: 50.0% 2A: 75.0% 10A: 100.0%

NO. TOMAS 2
 NUDO COTA DOT.ANU. I.R. ESCO. CONS. PRI RET 0 N D E F M A MY J JL AG S
 1-Toma 4 PUEBLOS 17 0.0 3.850 2 0.30 0.70 4 4 0.226 0.082 0.060 0.030 0.074 0.172 0.218 0.421 0.635 0.805 0.692 0.395
 2-Comp4Pueb 17 0.0 0.000 0 0.30 0.70 5 4 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000

* 6-Cullera

VOL DEM 0 N D E F M A MY J JL AG S
 0 0.762 0.267 0.189 0.089 0.238 0.577 0.735 1.435 2.239 2.875 2.445 1.428
 ACUIFERO RECARGADO 0 ACCION ELEM. 0
 ACUIFERO BOMBEO 0 ACCION ELEM. 0 Q MAX BOMBEO 0.000
 PARAM. CONTROL BOMBEO: 0 UMBRAL:0.0000E+00
 COEF. GARANTIAS: G. MENS.: 0.0% CRITERIO TIPO P.H.: M.: 30.0% A.: 15.0%
 CRITERIO TIPO UTAH DWR: 1A: 50.0% 2A: 75.0% 10A: 100.0%

NO. TOMAS 2
 NUDO COTA DOT.ANU. I.R. ESCO. CONS. PRI RET 0 N D E F M A MY J JL AG S
 1-Toma Cullera 18 0.0 13.300 2 0.00 1.00 4 0 0.762 0.267 0.189 0.089 0.238 0.577 0.735 1.435 2.239 2.875 2.445 1.428
 2-CompCullera 18 0.0 0.000 0 0.00 0.70 5 0 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000

* 7-Canal J-T

VOL DEM 0 N D E F M A MY J JL AG S
 6.000 1.200 0.600 0.000 0.000 0.000 3.000 4.800 9.600 12.600 12.600 9.600
 ACUIFERO RECARGADO 0 ACCION ELEM. 0
 ACUIFERO BOMBEO 0 ACCION ELEM. 0 Q MAX BOMBEO 0.000
 PARAM. CONTROL BOMBEO: 0 UMBRAL:0.0000E+00
 COEF. GARANTIAS: G. MENS.: 0.0% CRITERIO TIPO P.H.: M.: 30.0% A.: 15.0%
 CRITERIO TIPO UTAH DWR: 1A: 50.0% 2A: 75.0% 10A: 100.0%

NO. TOMAS 1
 NUDO COTA DOT.ANU. I.R. ESCO. CONS. PRI RET 0 N D E F M A MY J JL AG S
 1-Toma 1 D-6 23 0.0 60.000 5 0.00 1.00 6 0 6.000 1.200 0.600 0.000 0.000 0.000 3.000 4.800 9.600 12.600 12.600 9.600

* 8-Ab. Valencia

VOL DEM 0 N D E F M A MY J JL AG S
 7.886 7.886 7.886 7.886 7.886 7.886 7.886 7.886 7.980 7.980 7.980 7.980
 ACUIFERO RECARGADO 0 ACCION ELEM. 0
 ACUIFERO BOMBEO 0 ACCION ELEM. 0 Q MAX BOMBEO 0.000
 PARAM. CONTROL BOMBEO: 0 UMBRAL:0.0000E+00
 COEF. GARANTIAS: G. MENS.: 0.0% CRITERIO TIPO P.H.: M.: 30.0% A.: 15.0%
 CRITERIO TIPO UTAH DWR: 1A: 10.0% 2A: 16.0% 10A: 30.0%

NO. TOMAS 1
 NUDO COTA DOT.ANU. I.R. ESCO. CONS. PRI RET 0 N D E F M A MY J JL AG S
 1-Toma 1 D-7 24 0.0 96.000 0 0.00 1.00 0 0 7.886 7.886 7.886 7.886 7.886 7.886 7.886 7.886 7.980 7.980 7.980 7.980

* 9-Ab. Sagunto

VOL DEM 0 N D E F M A MY J JL AG S
 0.996 0.996 0.996 0.996 0.996 0.996 0.996 0.996 1.008 1.008 1.008 1.008
 ACUIFERO RECARGADO 0 ACCION ELEM. 0
 ACUIFERO BOMBEO 0 ACCION ELEM. 0 Q MAX BOMBEO 0.000
 PARAM. CONTROL BOMBEO: 0 UMBRAL:0.0000E+00
 COEF. GARANTIAS: G. MENS.: 0.0% CRITERIO TIPO P.H.: M.: 30.0% A.: 15.0%
 CRITERIO TIPO UTAH DWR: 1A: 10.0% 2A: 16.0% 10A: 30.0%

NO. TOMAS 1
 NUDO COTA DOT.ANU. I.R. ESCO. CONS. PRI RET 0 N D E F M A MY J JL AG S
 1-Toma 1 D-12 24 0.0 36.000 0 0.00 1.00 0 0 3.000 3.000 3.000 3.000 3.000 3.000 3.000 3.000 3.000 3.000 3.000 3.000

* 10-Ab. Albacete

VOL DEM 0 N D E F M A MY J JL AG S
 1.494 1.494 1.494 1.494 1.494 1.494 1.494 1.494 1.512 1.512 1.512 1.512
 ACUIFERO RECARGADO 0 ACCION ELEM. 0
 ACUIFERO BOMBEO 0 ACCION ELEM. 0 Q MAX BOMBEO 0.000
 PARAM. CONTROL BOMBEO: 0 UMBRAL:0.0000E+00
 COEF. GARANTIAS: G. MENS.: 0.0% CRITERIO TIPO P.H.: M.: 30.0% A.: 15.0%
 CRITERIO TIPO UTAH DWR: 1A: 10.0% 2A: 16.0% 10A: 30.0%

NO. TOMAS 1
 NUDO COTA DOT.ANU. I.R. ESCO. CONS. PRI RET 0 N D E F M A MY J JL AG S
 1-Toma 1 D-9 20 0.0 18.000 0 0.00 1.00 0 0 1.494 1.494 1.494 1.494 1.494 1.494 1.494 1.494 1.512 1.512 1.512 1.512

* 11-Ab. Marina Baja ATS

Apéndice G: Eco de datos del caso Júcar en SimGes

	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S								
VOL DEM	0.984	0.876	0.816	0.816	0.792	1.032	0.984	0.948	1.056	1.272	1.356	1.068								
ACUIFERO RECARGADO	0		ACCION ELEM.	0																
ACUIFERO BOMBEO	0		ACCION ELEM.	0	Q	MAX BOMBEO	0.000													
PARAM. CONTROL BOMBEO:	0		UMBRAL:0.0000E+00																	
COEF. GARANTIAS:	G. MENS.: 0.0%		CRITERIO TIPO P.H.:	M.: 30.0%		A.: 15.0%														
	CRITERIO TIPO UTAH DWR:	1A: 10.0%	2A: 16.0%	10A: 30.0%																
NO. TOMAS	1																			
TOMA	NUDO	CUTA	DOT.ANU.	I.R.	ESCO.	CONS.	PRI	RET	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
1-Toma 1 D-10	20	0.0	12.000	0	0.00	1.00	1	0	0.984	0.876	0.816	0.816	0.792	1.032	0.984	0.948	1.056	1.272	1.356	1.068

* 12-Sustitucion Mancha

	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S								
VOL DEM	1.050	0.000	0.000	0.000	0.150	0.600	0.600	0.900	1.200	3.600	4.350	2.550								
ACUIFERO RECARGADO	3		ACCION ELEM.	1																
ACUIFERO BOMBEO	3		ACCION ELEM.	2	Q	MAX BOMBEO	100.000													
PARAM. CONTROL BOMBEO:	0		UMBRAL:0.0000E+00																	
COEF. GARANTIAS:	G. MENS.: 0.0%		CRITERIO TIPO P.H.:	M.: 30.0%		A.: 15.0%														
	CRITERIO TIPO UTAH DWR:	1A: 50.0%	2A: 75.0%	10A: 100.0%																
NO. TOMAS	1																			
TOMA	NUDO	CUTA	DOT.ANU.	I.R.	ESCO.	CONS.	PRI	RET	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
1-Toma 1 D-11	20	0.0	15.000	5	0.00	0.80	6	0	1.050	0.000	0.000	0.000	0.150	0.600	0.600	0.900	1.200	3.600	4.350	2.550

* 13-Zona Albacete

	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S								
VOL DEM	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	48.950	173.550	178.000	44.500								
ACUIFERO RECARGADO	3		ACCION ELEM.	1																
ACUIFERO BOMBEO	3		ACCION ELEM.	2	Q	MAX BOMBEO	1000.000													
PARAM. CONTROL BOMBEO:	0		UMBRAL:0.0000E+00																	
COEF. GARANTIAS:	G. MENS.: 0.0%		CRITERIO TIPO P.H.:	M.: 30.0%		A.: 15.0%														
	CRITERIO TIPO UTAH DWR:	1A: 50.0%	2A: 75.0%	10A: 100.0%																
NO. TOMAS	1																			
TOMA	NUDO	CUTA	DOT.ANU.	I.R.	ESCO.	CONS.	PRI	RET	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
1-Toma Ficticia	4	0.0	0.000	0	0.00	0.80	1	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

* 14-A-Sueca

	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S								
VOL DEM	12.398	13.367	13.517	10.238	4.720	7.541	10.710	25.011	16.612	15.473	14.492	4.300								
ACUIFERO RECARGADO	0		ACCION ELEM.	0																
ACUIFERO BOMBEO	0		ACCION ELEM.	0	Q	MAX BOMBEO	0.000													
PARAM. CONTROL BOMBEO:	0		UMBRAL:0.0000E+00																	
COEF. GARANTIAS:	G. MENS.: 0.0%		CRITERIO TIPO P.H.:	M.: 30.0%		A.: 15.0%														
	CRITERIO TIPO UTAH DWR:	1A: 50.0%	2A: 75.0%	10A: 100.0%																
NO. TOMAS	2																			
TOMA	NUDO	CUTA	DOT.ANU.	I.R.	ESCO.	CONS.	PRI	RET	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
1-Princ Sueca-Arroz 17	0.0	148.400	2	0.00	1.00	4	0	12.398	13.367	13.517	10.238	4.720	7.541	10.710	25.011	16.612	15.473	14.492	4.300	
2-Comp Sueca-Arroz 17	0.0	0.000	0	0.00	1.00	5	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

* 15-A-4 Pueblos

	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S								
VOL DEM	1.854	1.998	2.020	1.530	0.706	1.128	1.602	3.739	2.485	2.315	2.168	0.645								
ACUIFERO RECARGADO	0		ACCION ELEM.	0																
ACUIFERO BOMBEO	0		ACCION ELEM.	0	Q	MAX BOMBEO	0.000													
PARAM. CONTROL BOMBEO:	0		UMBRAL:0.0000E+00																	
COEF. GARANTIAS:	G. MENS.: 0.0%		CRITERIO TIPO P.H.:	M.: 30.0%		A.: 15.0%														
	CRITERIO TIPO UTAH DWR:	1A: 50.0%	2A: 75.0%	10A: 100.0%																
NO. TOMAS	2																			
TOMA	NUDO	CUTA	DOT.ANU.	I.R.	ESCO.	CONS.	PRI	RET	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
1-Toma 4P-Arroz 17	0.0	22.200	2	0.30	0.70	4	4	1.854	1.998	2.020	1.530	0.706	1.128	1.602	3.739	2.485	2.315	2.168	0.645	
2-Comp 4P-Arroz 17	0.0	0.000	0	0.30	0.70	5	4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

* 16-A-Cullera

	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S								
VOL DEM	8.598	9.093	9.171	6.931	3.272	5.273	7.455	17.285	11.801	11.165	10.425	3.252								
ACUIFERO RECARGADO	0		ACCION ELEM.	0																
ACUIFERO BOMBEO	0		ACCION ELEM.	0	Q	MAX BOMBEO	0.000													
PARAM. CONTROL BOMBEO:	0		UMBRAL:0.0000E+00																	
COEF. GARANTIAS:	G. MENS.: 0.0%		CRITERIO TIPO P.H.:	M.: 30.0%		A.: 15.0%														
	CRITERIO TIPO UTAH DWR:	1A: 50.0%	2A: 75.0%	10A: 100.0%																
NO. TOMAS	2																			
TOMA	NUDO	CUTA	DOT.ANU.	I.R.	ESCO.	CONS.	PRI	RET	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
1-Princ Cullera-Ar 18	0.0	103.750	2	0.00	1.00	4	0	8.598	9.093	9.171	6.931	3.272	5.273	7.455	17.285	11.801	11.165	10.425	3.252	
2-Comp Cullera-Arr 18	0.0	0.000	0	0.00	1.00	5	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

Apéndice G: Eco de datos del caso Júcar en SimGes

* 17-A-Ac Real

	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S								
VOL DEM	9.965	15.125	4.769	10.434	6.412	7.312	10.313	16.106	8.329	8.217	8.079	2.651								
ACUFERO RECARGADO	4		ACCION ELEM.	1																
ACUFERO BOMBED	0		ACCION ELEM.	0	Q	MAX BOMBED	0.000													
PARAM. CONTROL BOMBED:	0		UMBRAL:0.0000E+00																	
COEF. GARANTIAS:	G. MENS.: 0.0%		CRITERIO TIPO P.H.: M.: 30.0%		A.: 15.0%															
			CRITERIO TIPO UTAH DWR: 1A: 50.0%		2A: 75.0%		10A: 100.0%													
NO. TOMAS	4																			
TOMA	NUDO	COTA	DOT.ANU.	I.R.	ESCO.	CONS.	PRI	RET	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
1-Neto-Arroz	42	0.0	27.900	0	0.00	1.00	2	0	1.724	0.786	1.475	0.632	0.548	1.542	1.571	6.453	4.469	4.933	3.099	0.630
2-Infiltracin-Arr	42	0.0	25.610	0	0.00	0.46	3	0	1.724	0.786	1.475	0.632	0.548	1.542	1.571	6.453	3.861	3.284	3.099	0.630
3-Ret Sup-Arroz	42	0.0	54.300	4	0.61	0.39	4	2	6.518	13.554	1.819	9.170	5.316	4.228	7.171	3.200	0.000	0.000	1.881	1.391
4-Toma 4 D-21	32	0.0	100.000	0	0.00	1.00	6	0	10.000	16.000	5.000	11.000	7.000	8.000	11.000	17.000	9.000	8.500	8.100	3.000

* 18-Reg Cabecera Cabriel

	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S								
VOL DEM	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000								
ACUFERO RECARGADO	0		ACCION ELEM.	0																
ACUFERO BOMBED	0		ACCION ELEM.	0	Q	MAX BOMBED	0.000													
PARAM. CONTROL BOMBED:	0		UMBRAL:0.0000E+00																	
COEF. GARANTIAS:	G. MENS.: 0.0%		CRITERIO TIPO P.H.: M.: 30.0%		A.: 15.0%															
			CRITERIO TIPO UTAH DWR: 1A: 50.0%		2A: 75.0%		10A: 100.0%													
NO. TOMAS	1																			
TOMA	NUDO	COTA	DOT.ANU.	I.R.	ESCO.	CONS.	PRI	RET	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
1-Toma 1 D-20	8	0.0	20.000	0	0.00	1.00	2	0	0.800	0.000	0.000	0.000	0.000	0.600	1.000	1.600	2.800	5.400	5.200	2.600

* 19-Reg Cabecera Jucar

	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S								
VOL DEM	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000								
ACUFERO RECARGADO	0		ACCION ELEM.	0																
ACUFERO BOMBED	0		ACCION ELEM.	0	Q	MAX BOMBED	0.000													
PARAM. CONTROL BOMBED:	0		UMBRAL:0.0000E+00																	
COEF. GARANTIAS:	G. MENS.: 0.0%		CRITERIO TIPO P.H.: M.: 30.0%		A.: 15.0%															
			CRITERIO TIPO UTAH DWR: 1A: 50.0%		2A: 75.0%		10A: 100.0%													
NO. TOMAS	1																			
TOMA	NUDO	COTA	DOT.ANU.	I.R.	ESCO.	CONS.	PRI	RET	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
1-Toma 1 D-24	1	0.0	0.000	0	0.00	1.00	5	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

* 20-Nuevos Regadios Cuenca

	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S								
VOL DEM	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000								
ACUFERO RECARGADO	0		ACCION ELEM.	0																
ACUFERO BOMBED	0		ACCION ELEM.	0	Q	MAX BOMBED	0.000													
PARAM. CONTROL BOMBED:	0		UMBRAL:0.0000E+00																	
COEF. GARANTIAS:	G. MENS.: 0.0%		CRITERIO TIPO P.H.: M.: 30.0%		A.: 15.0%															
			CRITERIO TIPO UTAH DWR: 1A: 50.0%		2A: 75.0%		10A: 100.0%													
NO. TOMAS	1																			
TOMA	NUDO	COTA	DOT.ANU.	I.R.	ESCO.	CONS.	PRI	RET	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
1-Toma 1 D-25	2	0.0	0.000	0	0.00	1.00	5	0	2.080	2.080	2.080	1.560	0.780	1.300	1.820	4.160	3.120	3.120	2.860	1.040

* 21-Tabilla

	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S								
VOL DEM	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000								
ACUFERO RECARGADO	0		ACCION ELEM.	0																
ACUFERO BOMBED	0		ACCION ELEM.	0	Q	MAX BOMBED	0.000													
PARAM. CONTROL BOMBED:	0		UMBRAL:0.0000E+00																	
COEF. GARANTIAS:	G. MENS.: 0.0%		CRITERIO TIPO P.H.: M.: 30.0%		A.: 15.0%															
			CRITERIO TIPO UTAH DWR: 1A: 50.0%		2A: 75.0%		10A: 100.0%													
NO. TOMAS	1																			
TOMA	NUDO	COTA	DOT.ANU.	I.R.	ESCO.	CONS.	PRI	RET	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S
1-Toma 1 D-26	20	0.0	0.000	0	0.00	1.00	5	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

* 22-Abast Marina Baja

	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S								
VOL DEM	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000								
ACUFERO RECARGADO	0		ACCION ELEM.	0																
ACUFERO BOMBED	0		ACCION ELEM.	0	Q	MAX BOMBED	0.000													
PARAM. CONTROL BOMBED:	0		UMBRAL:0.0000E+00																	
COEF. GARANTIAS:	G. MENS.: 0.0%		CRITERIO TIPO P.H.: M.: 30.0%		A.: 15.0%															
			CRITERIO TIPO UTAH DWR: 1A: 50.0%		2A: 75.0%		10A: 100.0%													
NO. TOMAS	1																			
TOMA	NUDO	COTA	DOT.ANU.	I.R.	ESCO.	CONS.	PRI	RET	O	N	D	E	F	M	A	MY	J	JL	AG	S

1-Marina Baja 21 0.0 0.000 0 0.00 1.00 5 0 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000

* 23-Abast Vinalop

0 N D E F M A MY J JL AG S
 VOL DEM 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
 ACUIFERO RECARGADO 0 ACCION ELEM. 0
 ACUIFERO BOMBEO 0 ACCION ELEM. 0 Q MAX BOMBEO 0.000
 PARAM. CONTROL BOMBEO: 0 UMBRAL:0.0000E+00
 COEF. GARANTIAS: G. MENS.: 0.0% CRITERIO TIPO P.H.: M.: 30.0% A.: 15.0%
 CRITERIO TIPO UTAH DWR: 1A: 50.0% 2A: 75.0% 10A: 100.0%
 NO. TOMAS 1
 TOMA NUDO COTA DOT.ANU. I.R. ESCO. CONS. PRI RET 0 N D E F M A MY J JL AG S
 1-Vinalop 21 0.0 0.000 0 0.00 1.00 5 0 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000

* 24-Reg Vinalop

0 N D E F M A MY J JL AG S
 VOL DEM 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
 ACUIFERO RECARGADO 0 ACCION ELEM. 0
 ACUIFERO BOMBEO 0 ACCION ELEM. 0 Q MAX BOMBEO 0.000
 PARAM. CONTROL BOMBEO: 0 UMBRAL:0.0000E+00
 COEF. GARANTIAS: G. MENS.: 0.0% CRITERIO TIPO P.H.: M.: 30.0% A.: 15.0%
 CRITERIO TIPO UTAH DWR: 1A: 50.0% 2A: 75.0% 10A: 100.0%
 NO. TOMAS 1
 TOMA NUDO COTA DOT.ANU. I.R. ESCO. CONS. PRI RET 0 N D E F M A MY J JL AG S
 1-Toma Reg Vinalop 21 0.0 0.000 0 0.00 1.00 5 0 2.080 2.080 2.080 1.560 0.780 1.300 1.820 4.160 3.120 3.120 2.860 1.040

RETORNOS

NO.-NOMBRE	NUDO
1-Ret CN Cofrentes	7
2-Ret Antella y Real	27
3-Ret Sup Escal y Carca	25
4-Ret4Pueblos	26

DEMANDAS NO CONSUNTIVAS

* 1-Cofrentes

NUDO TOMA 6 NUDO VERTIDOS 11 Q MAX 156.000 Q MIN 0.000 PRIORIDAD 7
 CENTRAL FLUYENTE SALTO BRUTO: 134.50 COEF. PROD.(GWH/(HM3.M)):.2000E-02
 Q OBJ 0 N D E F M A MY J JL AG S
 52.000 52.000 52.000 52.000 52.000 52.000 52.000 52.000 52.000 52.000 52.000 52.000

* 2-Cortes II

NUDO TOMA 12 NUDO VERTIDOS 13 Q MAX 855.000 Q MIN 0.000 PRIORIDAD 7
 EMBALSE: Cortes COTA DE CENTRAL: 235.00 COTA MIN TURB.: 300.00 COEF. PROD.(GWH/(HM3.M)):.2000E-02
 Q OBJ 0 N D E F M A MY J JL AG S
 285.000 285.000 285.000 285.000 285.000 285.000 285.000 285.000 285.000 285.000 285.000 285.000

* 3-Millares

NUDO TOMA 13 NUDO VERTIDOS 14 Q MAX 144.000 Q MIN 0.000 PRIORIDAD 7
 CENTRAL FLUYENTE SALTO BRUTO: 95.00 COEF. PROD.(GWH/(HM3.M)):.2000E-02
 Q OBJ 0 N D E F M A MY J JL AG S
 48.000 48.000 48.000 48.000 48.000 48.000 48.000 48.000 48.000 48.000 48.000 48.000

APORT. INTERMEDIAS

NO-NOMBRE	NUDO ENTRADA	NO.	COLUMNA APORTACION
1-Apo1. Alarcn	1		1
2-Apo2. Alarcn-Molinar	3		2
3-Apo3. Contreras	8		3
4-Apo.Sellent	33		5
5-Apo.Albaida	34		6
6-Apo. Verde	39		7
7-Apo.Magro	40		8
8-Apo. Confluencia	12		4

```

*****
ACUIFEROS
*****

* 1-ACU-Filtr.Contreras          CLASE: 2          MODELO UNICELULAR
  PARAM. CONTROL BOMBEO: 1      UMBRAL:0.0000E+00
  CDEF. DESAGUE: 0.9000E+00     VOL. INICIAL: 2.70

* 2-Acu Ret Escal y Carca        CLASE: 2          MODELO UNICELULAR
  PARAM. CONTROL BOMBEO: 0      UMBRAL:0.0000E+00
  CDEF. DESAGUE: 0.1800E+00     VOL. INICIAL: 5.00
  PARAM. CONTROL BOMBEO: 0      UMBRAL:0.0000E+00

* 4-AcuRetReal                  CLASE: 2          MODELO UNICELULAR
  PARAM. CONTROL BOMBEO: 0      UMBRAL:0.0000E+00
  CDEF. DESAGUE: 0.1800E+00     VOL. INICIAL: 25.00

* 5-Albufera                    CLASE: 2          MODELO UNICELULAR
  PARAM. CONTROL BOMBEO: 1      UMBRAL:0.0000E+00
  CDEF. DESAGUE: 0.1000E+01     VOL. INICIAL: 0.00
-----

*****
BOMBEO ADICIONALES
*****

* 1-PozosSeq
  ACUIF: 4 ACC. ELEM.: 1 Q MAX .2000E+02
  PARAM. CONTROL BOMBEO: 0      UMBRAL:0.0000E+00
  NUDO INCORPORACION 31        NO.GRUPOS ISOPR. A SUM. 0 NIVEL SUMINISTRO MAXIMO PARA ACTUACION 1.000
-----

*****
IND. RESTRICCION
*****

* 1-ActAlarc
  NO. EMBALSES: 1              NUMEROS: 1
  TABLA Vcrit - Coef. restric. ( 0 entradas)
  VOL. CRITICOS
  CDEF. RESTRICCION

* 2-RestACTbaja
  NO. EMBALSES: 3              NUMEROS: 1 3 6
  TABLA Vcrit - Coef. restric. ( 0 entradas)
  VOL. CRITICOS
  CDEF. RESTRICCION

* 3-ActACT
  NO. EMBALSES: 3              NUMEROS: 1 3 6
  TABLA Vcrit - Coef. restric. ( 0 entradas)
  VOL. CRITICOS
  CDEF. RESTRICCION

* 4-RestACTtrad
  NO. EMBALSES: 3              NUMEROS: 1 3 6
  TABLA Vcrit - Coef. restric. ( 0 entradas)
  VOL. CRITICOS
  CDEF. RESTRICCION

* 5-ResACTresto
  NO. EMBALSES: 3              NUMEROS: 1 3 6
  TABLA Vcrit - Coef. restric. ( 0 entradas)
  VOL. CRITICOS
  CDEF. RESTRICCION

* 6-AbstAlbacete

```

NO. EMBALSES: 1		NUMEROS: 1								
TABLA Vcrit - Coef. restric. (4 entradas)										
VOL. CRITICOS	30.000	30.100	50.000	50.100						
COEF. RESTRICCION	1.000	0.500	0.500	0.000	1.000	0.500	0.500	0.000	1.000	0.500
	1.000	0.500	0.500	0.000	1.000	0.500	0.500	0.000	1.000	0.500
	0.500	0.000	1.000	0.500	0.500	0.000	1.000	0.500	0.500	0.000
	1.000	0.500	0.500	0.000	1.000	0.500	0.500	0.000	1.000	0.500
	0.500	0.000	1.000	0.500	0.500	0.000	1.000	0.500	0.500	0.000
	1.000	0.500	0.500	0.000	1.000	0.500	0.500	0.000	1.000	0.500

TABLA Vcrit - Coef. restriccion modificados

INDICE: 1 ActAlarc							
1							
VOLUMEN	0.000	278.000	278.100	1000.000			
RESTRICCION	0.000	0.000	1.000	1.000			
2							
VOLUMEN	0.000	287.000	287.100	1000.000			
RESTRICCION	0.000	0.000	1.000	1.000			
3							
VOLUMEN	0.000	287.000	287.100	1000.000			
RESTRICCION	0.000	0.000	1.000	1.000			
4							
VOLUMEN	0.000	326.000	326.100	1000.000			
RESTRICCION	0.000	0.000	1.000	1.000			
5							
VOLUMEN	0.000	334.000	334.100	1000.000			
RESTRICCION	0.000	0.000	1.000	1.000			
6							
VOLUMEN	0.000	326.000	326.100	1000.000			
RESTRICCION	0.000	0.000	1.000	1.000			
7							
VOLUMEN	0.000	311.000	311.100	1000.000			
RESTRICCION	0.000	0.000	1.000	1.000			
8							
VOLUMEN	0.000	278.000	278.100	1000.000			
RESTRICCION	0.000	0.000	1.000	1.000			
9							
VOLUMEN	0.000	263.000	263.100	1000.000			
RESTRICCION	0.000	0.000	1.000	1.000			
10							
VOLUMEN	0.000	263.000	263.100	1000.000			
RESTRICCION	0.000	0.000	1.000	1.000			
11							
VOLUMEN	0.000	263.000	263.100	1000.000			
RESTRICCION	0.000	0.000	1.000	1.000			
12							
VOLUMEN	0.000	263.000	263.100	1000.000			
RESTRICCION	0.000	0.000	1.000	1.000			
INDICE: 2 RestACTbaja							
1							
VOLUMEN	0.000	200.000	200.100	278.000	278.100	1000.000	
RESTRICCION	0.250	0.250	0.100	0.100	0.000	0.000	
2							
VOLUMEN	0.000	200.000	200.100	287.000	287.100	1000.000	
RESTRICCION	0.250	0.250	0.100	0.100	0.000	0.000	
3							
VOLUMEN	0.000	200.000	200.100	287.000	287.100	1000.000	
RESTRICCION	0.250	0.250	0.100	0.100	0.000	0.000	
4							
VOLUMEN	0.000	200.000	200.100	326.000	326.100	1000.000	
RESTRICCION	0.250	0.250	0.100	0.100	0.000	0.000	
5							
VOLUMEN	0.000	200.000	200.100	334.000	334.100	1000.000	
RESTRICCION	0.250	0.250	0.100	0.100	0.000	0.000	
6							
VOLUMEN	0.000	200.000	200.100	326.000	326.100	1000.000	
RESTRICCION	0.250	0.250	0.100	0.100	0.000	0.000	
7							
VOLUMEN	0.000	200.000	200.100	311.000	311.100	1000.000	
RESTRICCION	0.250	0.250	0.100	0.100	0.000	0.000	
8							
VOLUMEN	0.000	200.000	200.100	278.000	278.100	1000.000	
RESTRICCION	0.250	0.250	0.100	0.100	0.000	0.000	
9							
VOLUMEN	0.000	200.000	200.100	263.000	263.100	1000.000	
RESTRICCION	0.250	0.250	0.100	0.100	0.000	0.000	
10							
VOLUMEN	0.000	200.000	200.100	263.000	263.100	1000.000	
RESTRICCION	0.250	0.250	0.100	0.100	0.000	0.000	
11							
VOLUMEN	0.000	200.000	200.100	263.000	263.100	1000.000	
RESTRICCION	0.250	0.250	0.100	0.100	0.000	0.000	
12							

VOLUMEN	0.000	200.000	200.100	263.000	263.100	1000.000
RESTRICCION	0.250	0.250	0.100	0.100	0.000	0.000
INDICE: 3	ActACT					
1						
VOLUMEN	0.000	278.000	278.100	1000.000		
RESTRICCION	0.000	0.000	1.000	1.000		
2						
VOLUMEN	0.000	287.000	287.100	1000.000		
RESTRICCION	0.000	0.000	1.000	1.000		
3						
VOLUMEN	0.000	287.000	287.100	1000.000		
RESTRICCION	0.000	0.000	1.000	1.000		
4						
VOLUMEN	0.000	326.000	326.100	1000.000		
RESTRICCION	0.000	0.000	1.000	1.000		
5						
VOLUMEN	0.000	334.000	334.100	1000.000		
RESTRICCION	0.000	0.000	1.000	1.000		
6						
VOLUMEN	0.000	326.000	326.100	1000.000		
RESTRICCION	0.000	0.000	1.000	1.000		
7						
VOLUMEN	0.000	311.000	311.100	1000.000		
RESTRICCION	0.000	0.000	1.000	1.000		
8						
VOLUMEN	0.000	278.000	278.100	1000.000		
RESTRICCION	0.000	0.000	1.000	1.000		
9						
VOLUMEN	0.000	263.000	263.100	1000.000		
RESTRICCION	0.000	0.000	1.000	1.000		
10						
VOLUMEN	0.000	263.000	263.100	1000.000		
RESTRICCION	0.000	0.000	1.000	1.000		
11						
VOLUMEN	0.000	263.000	263.100	1000.000		
RESTRICCION	0.000	0.000	1.000	1.000		
12						
VOLUMEN	0.000	263.000	263.100	1000.000		
RESTRICCION	0.000	0.000	1.000	1.000		
INDICE: 4	RestACTtrad					
1						
VOLUMEN	0.000	200.000	200.100	278.000	278.100	1000.000
RESTRICCION	1.000	1.000	0.400	0.400	0.000	0.000
2						
VOLUMEN	0.000	200.000	200.100	287.000	287.100	1000.000
RESTRICCION	1.000	1.000	0.400	0.400	0.000	0.000
3						
VOLUMEN	0.000	200.000	200.100	287.000	287.100	1000.000
RESTRICCION	1.000	1.000	0.400	0.400	0.000	0.000
4						
VOLUMEN	0.000	200.000	200.100	326.000	326.100	1000.000
RESTRICCION	1.000	1.000	0.400	0.400	0.000	0.000
5						
VOLUMEN	0.000	200.000	200.100	334.000	334.100	1000.000
RESTRICCION	1.000	1.000	0.400	0.400	0.000	0.000
6						
VOLUMEN	0.000	200.000	200.100	326.000	326.100	1000.000
RESTRICCION	1.000	1.000	0.400	0.400	0.000	0.000
7						
VOLUMEN	0.000	200.000	200.100	311.000	311.100	1000.000
RESTRICCION	1.000	1.000	0.400	0.400	0.000	0.000
8						
VOLUMEN	0.000	200.000	200.100	278.000	278.100	1000.000
RESTRICCION	1.000	1.000	0.400	0.400	0.000	0.000
9						
VOLUMEN	0.000	200.000	200.100	263.000	263.100	1000.000
RESTRICCION	1.000	1.000	0.400	0.400	0.000	0.000
10						
VOLUMEN	0.000	200.000	200.100	263.000	263.100	1000.000
RESTRICCION	1.000	1.000	0.400	0.400	0.000	0.000
11						
VOLUMEN	0.000	200.000	200.100	263.000	263.100	1000.000
RESTRICCION	1.000	1.000	0.400	0.400	0.000	0.000
12						
VOLUMEN	0.000	200.000	200.100	263.000	263.100	1000.000
RESTRICCION	1.000	1.000	0.400	0.400	0.000	0.000
INDICE: 5	ResACTresto					
1						
VOLUMEN	0.000	200.000	200.100	278.000	278.100	1000.000
RESTRICCION	0.300	0.300	0.200	0.200	0.000	0.000
2						
VOLUMEN	0.000	200.000	200.100	287.000	287.100	1000.000
RESTRICCION	0.300	0.300	0.200	0.200	0.000	0.000
3						
VOLUMEN	0.000	200.000	200.100	287.000	287.100	1000.000
RESTRICCION	0.300	0.300	0.200	0.200	0.000	0.000
4						
VOLUMEN	0.000	200.000	200.100	326.000	326.100	1000.000
RESTRICCION	0.300	0.300	0.200	0.200	0.000	0.000
5						

VOLUMEN	0.000	200.000	200.100	334.000	334.100	1000.000
RESTRICCIÓN	0.300	0.300	0.200	0.200	0.000	0.000
6						
VOLUMEN	0.000	200.000	200.100	326.000	326.100	1000.000
RESTRICCIÓN	0.300	0.300	0.200	0.200	0.000	0.000
7						
VOLUMEN	0.000	200.000	200.100	311.000	311.100	1000.000
RESTRICCIÓN	0.300	0.300	0.200	0.200	0.000	0.000
8						
VOLUMEN	0.000	200.000	200.100	278.000	278.100	1000.000
RESTRICCIÓN	0.300	0.300	0.200	0.200	0.000	0.000
9						
VOLUMEN	0.000	200.000	200.100	263.000	263.100	1000.000
RESTRICCIÓN	0.300	0.300	0.200	0.200	0.000	0.000
10						
VOLUMEN	0.000	200.000	200.100	263.000	263.100	1000.000
RESTRICCIÓN	0.300	0.300	0.200	0.200	0.000	0.000
11						
VOLUMEN	0.000	200.000	200.100	263.000	263.100	1000.000
RESTRICCIÓN	0.300	0.300	0.200	0.200	0.000	0.000
12						
VOLUMEN	0.000	200.000	200.100	263.000	263.100	1000.000
RESTRICCIÓN	0.300	0.300	0.200	0.200	0.000	0.000

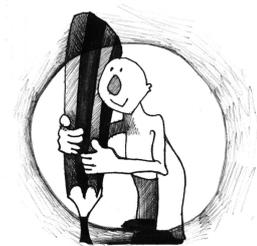
Apéndice H: Glosario

- acuífero: formación geológica subterránea porosa, de la cual resulta económicamente factible extraer el agua allí almacenada.
- conjunto convexo: es una colección de puntos tales que, los puntos del segmento rectilíneo que une a dos puntos cualesquiera del conjunto también pertenecen al conjunto.
- contingente: hipotético. Que puede acontecer o no.
- coste: idem costo.
- costos de transacción: los costos de establecer, operar y hacer cumplir una asignación de recursos, gestión, o sistema de regulación. También son llamados IEC costs: costos de obtener información de las necesidades y actitudes de los participantes, costos requeridos para alcanzar acuerdos, y costos para controlar y hacer cumplir las leyes y las regulaciones. En el caso del agua suelen ser relativamente altos respecto al valor del recurso.
- costo de oportunidad: es el beneficio (perdido) que se obtendría de suministrar una unidad adicional de agua al siguiente uso más conveniente. Un ejemplo clásico del costo de oportunidad del capital invertido en un emprendimiento es el rendimiento que se obtendría de poner ese capital en el banco.
- demanda: agua pretendida bajo ciertas circunstancias económicas, en particular el precio.
- excedente del consumidor: diferencia entre el precio que estaría dispuesto a pagar por un determinado bien o servicio y el precio que efectivamente paga.
- excedente del productor: diferencia entre el precio al que estaría dispuesto a vender un determinado bien y servicio, y el precio al que efectivamente lo vende.
- hedónico: relativo al placer.
- holístico: perteneciente o relativo al holismo. holismo: doctrina que propugna la concepción de cada realidad como un todo distinto de la suma de las partes que lo componen.
- incertidumbre: cuando no se conocen las probabilidades de un cierto estado de la naturaleza. (*véase riesgo*)
- intrínseco: esencial, propio, constitutivo.
- necesidad: demanda de agua de baja cantidad, cuando su comportamiento es muy inelástico, fundamentalmente destinado a bebida, preparación de alimentos y aseo.
- modelos input-output: estos modelos sirven para estudiar las interrelaciones entre los principales sectores productivos de una región y predecir los efectos acumulados de cambios en la disponibilidad de los factores productivos. [Young y Gray, 1985] utiliza esta clase de modelos a escala regional para determinar los beneficio a escala regional de los distintos sectores implicados en el uso del agua, en función del sistema de suministro existente.
- precio sombra: el precio estimado para los bienes que no tienen mercado, como el valor público de los bienes ambientales, etc.

- requerimiento: cantidad de agua correspondiente a valor marginal nulo.
- riesgo: cuando se conocen las probabilidades de un cierto estado de la naturaleza. (*véase incertidumbre*)

En lo personal, la concreción de este trabajo ha resultado una victoria pírrica: he trabajado mucho, y en gran soledad hasta el momento en que los programas funcionaban y se obtenían resultados útiles de forma que tanto los aciertos como los errores son casi en su totalidad propios.

Doy gracias a Dios por ayudarme a superar las dificultades propias que entraña la realización de una tesis doctoral y las dificultades añadidas en el último año y medio.



¡ Al fin ! A partir de ahora me propongo firmemente dedicar mi tiempo a las cosas realmente importantes de la vida.