

Reglas de operación para sistemas multiembalse, combinando métodos heurísticos y redes de flujo

Javier Paredes-Arquiola
Abel Solera-Solera

Universidad Politécnica de Valencia, España

Joaquín Andreu-Álvarez

Universidad Politécnica de Valencia, España
Ministerio de Medio Ambiente, España

La obtención de las reglas de operación para los sistemas multiembalse ha sido un aspecto muy estudiado mediante técnicas de optimización y simulación de sistemas de recursos hídricos. En este artículo se presenta un método heurístico para la obtención de reglas de operación basadas en curvas de embalses para sistemas multiembalse. El método se basa en la búsqueda del volumen mínimo necesario para, definidos un sistema y unas aportaciones, garantizar con una probabilidad fijada una o un conjunto de demandas consuntivas. Para ello se utiliza un algoritmo de búsqueda secuencial que, para cada paso, utiliza un modelo de simulación del sistema. Para la creación del modelo de simulación se ha utilizado el programa SIMGES del Sistema Soporte a la Decisión AQUATOOL. Como caso de aplicación, se ha escogido la cuenca del río Mijares, ubicada al este de España. Esta cuenca se caracteriza por sufrir fuertes procesos de sequía, tener un sistema de derechos muy arraigado entre los usuarios y contar con la posibilidad de realizar el uso conjunto superficial-subterráneo del recurso.

Palabras clave: gestión de embalses, simulación, AQUATOOL, SIMGES, reglas de operación, sistemas multiembalse, curvas de operación, optimización heurística.

Introducción

Diversos autores han reiterado la falta de aplicación de los modelos de optimización a la gestión real de los sistemas multiembalse (Yeh, 1985; Wurbs, 1993; Labadie, 2004). Una de las causas fundamentales de este efecto es el necesario y elevado grado de simplificación de estos modelos, que los alejan, excesivamente, de la realidad, como para que los gestores confíen sus decisiones a los resultados de los mismos. Por otro lado, los modelos de simulación son la herramienta más utilizada para el análisis y la planificación de sistemas de recursos hídricos. Estos modelos permiten una representación más detallada de los sistemas que los modelos de optimización (Loucks y Sigvaldason, 1982). Por ello, en general, la gestión de las cuencas se realiza mediante el

apoyo de modelos de simulación, que se caracterizan por su flexibilidad y su capacidad para contener elementos muy complejos en la modelación. Sin embargo, estos modelos requieren el establecimiento predeterminado de las reglas de operación o la definición de la forma de gestión del sistema.

El diseño y la obtención de reglas de operación para sistemas multiembalse ha sido un tema muy desarrollado a lo largo de la historia científica de los recursos hídricos.

La obtención de reglas de operación a partir de los resultados de los modelos de optimización pasa por el uso de regresiones lineales (Young, 1967), regresiones lineales múltiples (Bhaskar y Withlach, 1980), y el uso de sencillas estadísticas, tablas y diagramas (Lund y Ferreira, 1996). Desafortunadamente, los análisis de

regresión pueden dar resultados muy pobres en sus correlaciones, invalidando las reglas de operación obtenidas (Labadie, 2004).

Por otro lado, reglas de operación heurística, como la regla del espacio vacío (Bower *et al.*, 1962) o la regla de la ciudad de Nueva York (Clark, 1956) tienen una reducida aplicabilidad. Conocidos unos volúmenes iniciales de almacenamiento, capacidades y restricciones del sistema, la aplicación de la regla del espacio vacío no es siempre factible ni razonable (Johnson *et al.*, 1991).

Aunque algunos autores han criticado las "curvas de embalse" como reglas de operación por no ser las más eficientes posibles (Karamouz *et al.*, 2000). La gestión real de los sistemas se suele realizar con este tipo de reglas debido a su fácil aplicación y entendimiento. Por otro lado, hay varios aspectos por los que estas curvas de embalse adquieren especial importancia. En primer lugar, un gran número de los sistemas multiembalse se gestionan mediante la división de los embalses en capas (*Pool-Based Rule System*). Por ejemplo, muchos de los embalses del cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos se basan en la definición de capas o zonas para su gestión (Lund y Ferreira, 1996). Estas zonas de embalse se basan en conjuntos de curvas de embalse que los dividen. Además, las curvas de embalse son fáciles de entender para los usuarios y para el gestor de cuenca, sencillas para su incorporación en el marco legislativo y extremadamente útiles como disparadores para la toma de decisión en momentos de sequía. Típicamente, estas decisiones tienen que ver con lo siguiente: restricciones a transferencias, restricciones sobre demandas no prioritarias y puesta en marcha de medidas extraordinarias, como puede ser la activación de pozos de sequía, entre otras.

Históricamente, el uso de este tipo de curvas en la gestión de sistemas de recursos hídricos reales ha sido muy alto. El mayor trasvase actual en España, el trasvase Tajo-Segura, se rige mediante diferentes curvas de operación aprobadas en el Plan Hidrológico de la cuenca del Tajo (MMA, 1999). Otro ejemplo: en la cuenca del Júcar se establece una curva de operación definida en el "Convenio de Alarcón" (MMA, 2001) para la protección de derechos de los regantes tradicionales. La cuenca objeto de estudio, la cuenca del río Mijares, se gestiona mediante una curva de operación definida en 1973 por usuarios y gestores de la cuenca (CHJ, 1973).

En este artículo se plantea la obtención de curvas de embalse que sirvan como reglas de operación de sistemas multiembalse mediante un método heurístico que utiliza como base un modelo de simulación de redes de flujo. Este método permite la obtención de un

volumen de reserva, definido por la curva a estimar, de un embalse o conjunto de embalses que garanticen, con un criterio de garantía definido, el suministro de una demanda o conjunto de ellas. Estos volúmenes de reserva estimados se traducen en curvas de embalse que sirven tanto para su directa aplicación en la toma de decisiones como para su incorporación en el modelo de simulación de cuenca. El método heurístico tiene como base la ejecución múltiple de un modelo de simulación de cuenca representativo del sistema. Para este caso se ha escogido el modelo *SIMGES* (Andreu *et al.*, 1992) de modelación de la gestión de sistemas de recursos hídricos. Este programa permite la creación de modelos de simulación muy complejos, gracias al elevado tipo de elementos disponibles para crear modelos tanto superficiales como subterráneos.

Como caso de aplicación se ha escogido una cuenca mediterránea: el río Mijares. Esta cuenca se caracteriza por un uso principal de consumo agrario y pequeños suministros urbanos. En esta cuenca conviven riegos tradicionales de varios siglos de historia, junto con regadíos más modernos y menos prioritarios. Además, este sistema es interesante debido a las frecuentes situaciones de sequía que se producen, el sistema de derechos vigente entre usuarios y la posibilidad de realizar un uso conjunto superficial-subterráneo del recurso.

El modelo heurístico de obtención de curvas de operación

El método heurístico estocástico que se presenta realiza una búsqueda iterativa que permite estimar el volumen mínimo embalsado en uno o en el conjunto de varios embalses, necesario para el cumplimiento de las condiciones de suministro de las demandas "prioritarias" de todas las simulaciones múltiples de las series, de longitud definida, obtenidas de la serie histórica o de series sintéticas. Repitiendo el proceso doce veces, con inicio cada una de los meses del año, se obtiene una regla de decisión en función del mes en cuestión y del volumen embalsado. El grado de seguridad de la curva obtenida depende del tipo de garantía utilizada, el umbral de cumplimiento impuesto y de las series de aportaciones utilizadas.

Matemáticamente, la base del método es la siguiente:

El valor de la curva de reservas para el mes τ_i sería el siguiente:

$$CR_i = \min(V_i) / \phi_{ijk} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, 12 \quad (1)$$

Donde CR_i representa para cada mes "i" ($i=1, \dots, 12$), la curva estimada definida por el volumen mínimo necesario V_i del embalse o suma de embalses definidos. La función ϕ_{ijk} representa la condición de garantía prefijada y se estima de la siguiente forma:

$$\phi_{ijk} = f(i, V_j, A_k, D_l) \quad (2)$$

Donde la función f consiste en calcular la gestión del sistema de recursos hídricos durante el periodo de anticipación definido con inicio en el mes del año i ($i=1, \dots, 12$), con un conjunto de volúmenes de reservas en embalses dados por V_j , y para una serie de aportaciones naturales A_k . Esta función tomaría el valor 1 si se cumplen los objetivos de garantía para las demandas D_l y el valor 0 en caso de que no se cumplan.

Además, el número de cálculos a realizar se reduce sustancialmente debido a que se cumplen las siguientes propiedades:

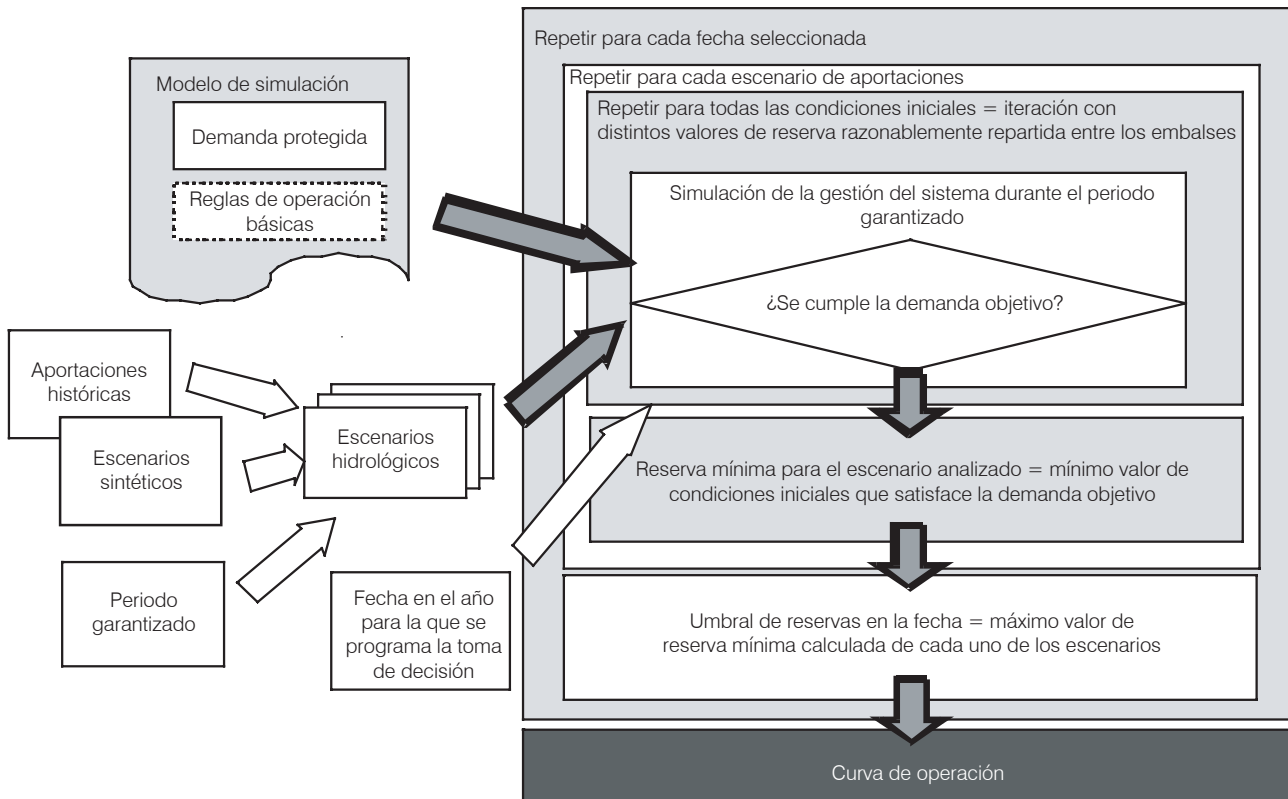
$$\text{si } \phi_{ijk} = 1 \Rightarrow \phi_{imk} = 1 \quad \forall \{m \mid V_m > V_j\} \quad (3)$$

$$\text{si } \exists i, j: \phi_{ijk} = 0 \Rightarrow CR_{\tau=i} > V_j \quad (4)$$

Donde m representa el número de serie simulada. El proceso de cálculo se resume en la ilustración 1.

Como se puede ver en el diagrama, para cada mes del año se parte de un volumen inicial nulo y se ejecuta, de forma múltiple, el modelo de simulación del sistema para un conjunto de series obtenidas de la serie histórica o sintética. El periodo de la longitud de las series depende de la longitud necesaria para estimar el criterio de satisfacción de la demanda. Se parte con un volumen inicial de embalse nulo y si en alguna simulación el criterio de satisfacción de las "demandas prioritarias" no es satisfactorio, se incrementa el volumen inicial hasta que se cumpla el criterio de satisfacción. Una vez que se ha encontrado el volumen inicial de esa serie se continúa simulando el resto de las series de aportaciones, pero con un volumen inicial igual al estimado. Si en alguna de las series que quedan por simular no se cumple el criterio de satisfacción de la demanda, se realiza de nuevo el proceso de incrementar el volumen inicial. Cuando se acaban de probar todas las posibles series, el volumen inicial obtenido define la curva de embalse para ese mes. Se repite todo el proceso anterior para cada mes del año.

Ilustración 1. Diagrama del algoritmo utilizado.



Previamente a la aplicación del método de optimización se requiere de lo siguiente: disponer de un modelo de simulación representativo de la realidad y de la gestión actual del sistema, definir qué embalse o conjunto de embalses dentro del sistema son susceptibles de la curva de decisión, qué demandas son las prioritarias, y cuál es el criterio y nivel de satisfacción a utilizar.

La regla de decisión obtenida es una curva de volumen almacenado que puede ser utilizada como regla de decisión para el establecimiento de medidas. Este método está pensado fundamentalmente para sistemas de recursos hídricos con problemas de suministro en épocas de sequía.

El programa SIMGES para la modelación de la simulación de sistemas de recursos hídricos

El método heurístico propuesto requiere la iteración múltiple de un modelo de simulación representativo del sistema de recursos hídricos en análisis. Para ello se plantea el uso del programa SIMGES del Sistema Soporte de Decisión AQUATOOL (Andreu et al., 1996). Tanto el módulo de simulación como el SSD han sido ampliamente aplicados en diferentes cuencas españolas y del extranjero. El modelo SIMGES se basa en la conceptualización de las cuencas hídricas en redes compuestas por arcos y nudos. Los nudos representan confluencias o divergencias de tramos fluviales, embalses, demandas, etcétera. Por otro lado, los arcos representan cualquier flujo de agua, ya sean naturales o artificiales. Además, la combinación de nudos y arcos permite modelar otro tipo de elementos, como centrales hidroeléctricas, retornos al sistema, etcétera. Los arcos se definen mediante el nudo origen y el final, los flujos máximo y mínimo que pueden circular por él, y el coste que produce cada unidad de recurso que circula por él. Matemáticamente, el modelo de simulación se basa en la resolución, para cada intervalo de tiempo (en este caso, el mes) de una red de flujo conservativa y conexa. Este problema se expresa matemáticamente de la siguiente forma:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^m x_{ij} - \sum_{k=1}^m x_{ki} &= 0 \quad \forall i = 1, \dots, m \\ x_{ij} &\geq l_{ij} \quad \forall i = 1, \dots, m \quad \forall j = 1, \dots, m \\ x_{ij} &\leq u_{ij} \quad \forall i = 1, \dots, m \quad \forall j = 1, \dots, m \end{aligned} \quad (6)$$

Siendo x_{ij} el flujo a través del arco del nudo "i" al "j"; c_{ij} es el coste por cada unidad de flujo; l_{ij} y u_{ij} son los límites mínimo y máximo de circulación de caudal para el arco de origen, el nudo "i" y fin el nudo "j". En la realidad, el modelo permite incumplir el requerimiento de caudal mínimo, pero no el de caudal máximo. Bajo estas características, el problema de optimización planteado se puede resolver, eficientemente, mediante el uso del algoritmo *Out-of-Kilter* (Ford y Fulkerson, 1962).

Para la creación de modelos por parte de diferentes usuarios, el modelo SIMGES se controla desde la interfaz gráfica SIMWIN del SSD AQUATOOL, que permite crear modelos de cuencas hídricas mediante una interfaz amigable al usuario.

Entre los diferentes elementos (ver ilustración 2) que se pueden utilizar para representar el modelo de cuenca se encuentran:

- Las aportaciones o caudales no regulados se representan por flechas dobles. Debido a que el programa no incluye un modelo de precipitación-escorrentía, las series de caudales aportados por las cuencas deben ser proporcionadas. Estas aportaciones pueden provenir de la restitución a régimen natural de datos de aforo, modelos precipitación-escorrentía o series sintéticas obtenidas por métodos estadísticos. Internamente, el modelo realiza su inclusión dentro de la red de flujo, creando un arco en donde el límite superior y el inferior sean iguales al dato proporcionado.
- Los embalses, representados por triángulos, son nudos en los que se permite el almacenamiento. El almacenamiento se concibe internamente como un arco ficticio. La gestión entre los embalses se define mediante unas curvas anuales de zonado y un número de prioridad. El modelo intenta mantener el volumen almacenado en todos los embalses en la misma zona, comenzando a desembalsar por los embalses de menor prioridad.
- Las demandas consuntivas, representadas mediante cuadrados, vienen definidas por una curva de demanda variable por mes y constante por año. El modelo SIMGES puede considerarse un programa para modelar sistemas de demandas con "derechos", ya que el suministro entre las diferentes demandas se hace en función de unas prioridades definidas para cada demanda. Al igual que en los embalses, mayor número significa menor prioridad real.
- Parte o la totalidad de los sobrantes de las demandas consuntivas pueden reincorporarse al sistema mediante los elementos de retorno, los cuales se representan mediante flechas curvas.

- Cada demanda puede ser suministrada por una o varias tomas. De esta forma, una demanda puede ser suministrada desde varios puntos de la red. Las tomas se representan mediante flechas simples que parten de algún nudo y finalizan en una demanda.
- Las demandas no consuntivas se definen mediante un caudal objetivo mensual y una serie de características que permiten estimar la energía producida. En el esquema vienen representadas por círculos con una línea curva en el interior.
- Los acuíferos están representados por octágonos. Una de las ventajas del modelo *SIMGES* frente a otros muchos modelos es la capacidad de incluir diferentes tipos de acuíferos, así como sus relaciones con el sistema superficial. Se pueden incluir acuíferos del tipo: depósito, unicelular, manantial, rectangular homogéneo con conexión a uno o dos ríos, acuífero a tres niveles, multicelda y autovalores. Este último permite introducir un modelo distribuido previamente desarrollado con el módulo *AQUIVAL* (Andreu et al., 1996). El módulo

AQUIVAL, perteneciente al *SSD AQUATOOL*, permite realizar modelos distribuidos de acuíferos mediante el método de autovalores (Andreu y Sahuquillo, 1987).

- Elementos de relación. Para establecer las relaciones entre el sistema superficial y subterráneo se dispone de una serie de elementos, como conducciones con filtraciones, conducciones con conexión hidráulica con el acuífero, bombes adicionales, recargas artificiales, y recargas y bombes desde las demandas. Esto permite disponer de un conjunto de elementos para poder modelar hasta los casos más complejos de relaciones superficiales-subterráneas.

Para acabar de definir la gestión del sistema, junto al sistema de prioridades, el modelo tiene la posibilidad de definir curvas de gestión para un embalse o un conjunto de ellos. Cuando el embalse o la suma del conjunto de embalses es inferior al definido en la curva de gestión, se puede introducir un coeficiente de restricción a diferentes elementos, como las tomas de suministro,

Ilustración 2. Sistema ficticio donde se muestran todos los elementos disponibles en el modelo *SIMGES* para la creación de modelos.

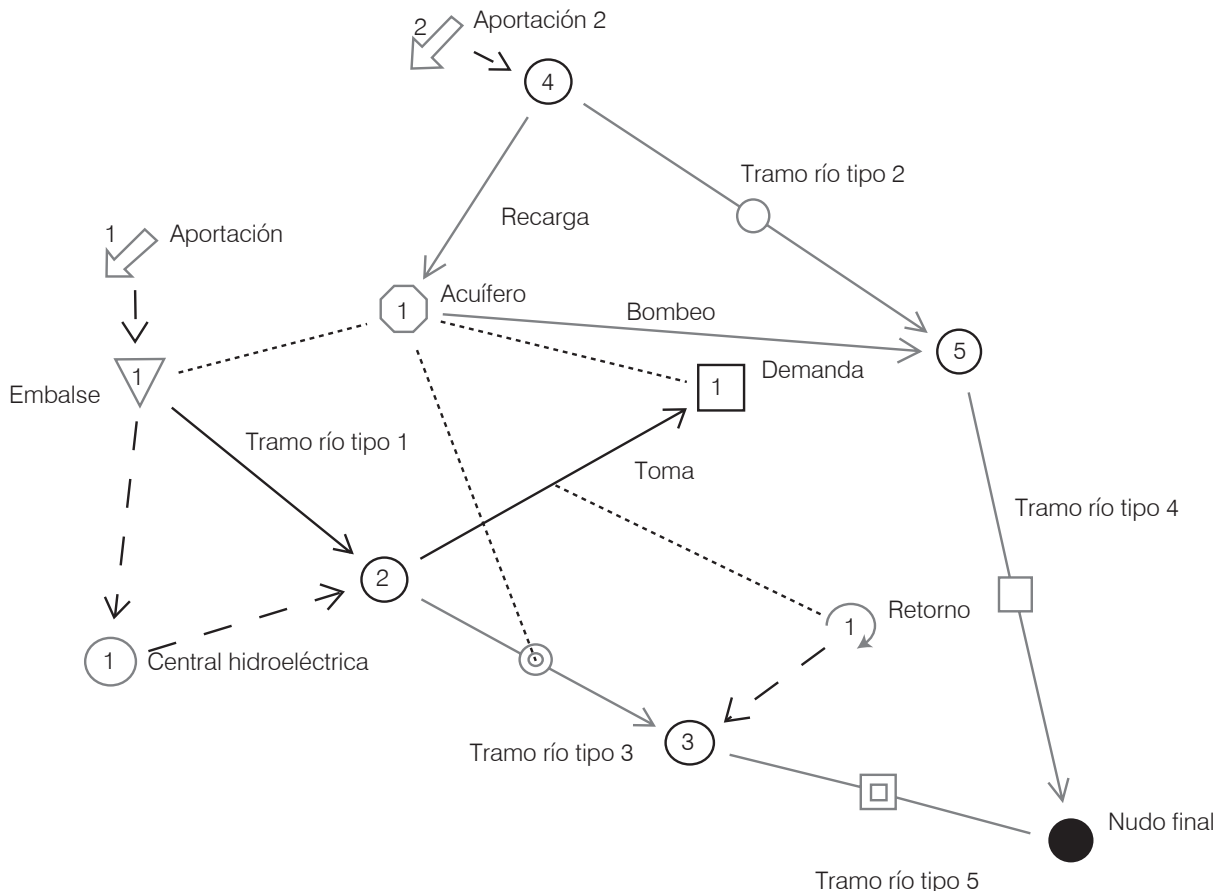


Ilustración 3. Localización de la cuenca del río Mijares.

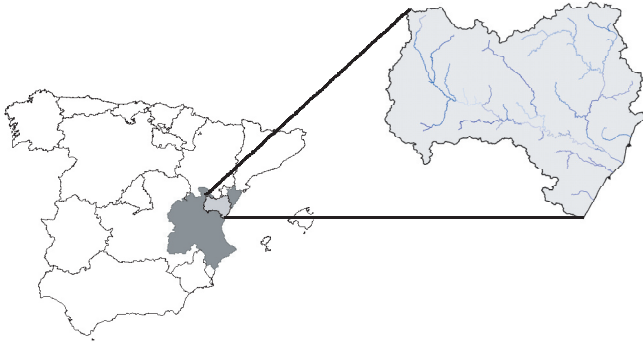


Ilustración 4. Elementos principales de la cuenca del río Mijares.



conducciones, bombes, etcétera. De esta forma, la definición de reglas de operación es un elemento muy versátil para la toma de decisiones.

La no linealidad de algunos de los procesos, como evaporaciones, filtraciones o la modelación de acuíferos, se resuelve mediante procesos iterativos de resolución de la red de flujo. En realidad, la función objetivo planteada en la ecuación consta de un término para cada uno de los elementos modelados. Dicha contribución está basada en una serie de fórmulas para tener en cuenta diversos condicionantes de cada elemento. A continuación se explica el término de las demandas consuntivas. Una mayor explicación del funcionamiento y de la aportación del resto de elementos a la función objetivo se puede encontrar en el manual de SIMGES (Andreu et al., 1992):

$$T_{DC} = \sum_{i=1}^{ndc} \left(D_i CK + \sum_{t=1}^{ntoi} \left(SN_{ti} (CTC + (NP_{ti} - 1) CDC) \right) \right) \quad (7)$$

donde: T_{DC} es el término que condensa la contribución a la función objetivo de todas las demandas consuntivas de la cuenca; ndc , el número de demandas consuntivas; D_i , el déficit sobre la demanda total de la zona i en el mes en cuestión; CK , un costo ficticio constante asociado con los déficits de las zonas de demanda ($CK=750$ por defecto); $ntoi$, el número de tomas de la demanda i ; SN_{ti} , el suministro bruto a la toma t de la demanda i ; CTC y CDC , los valores constantes ($CTC=749$, $CDC=5$, por defecto) y NP_{ti} es el número de prioridad de la toma t de la demanda i .

Caso de aplicación

El río Mijares se encuentra ubicado en la vertiente oriental de la península Ibérica. La superficie total comprendida por este sistema es de 5 466 km². Con una población total en la zona de 363 578 habitantes, su suministro se realiza a partir de la explotación de pozos y el aprovechamiento de manantiales. La superficie total cultivada asciende a 124 310 hectáreas; de las cuales, 43 530 ha (35%) corresponden a regadíos; mientras que el resto (65%) son de secano. Los cítricos constituyen el cultivo predominante, con un porcentaje próximo al 87% de la superficie en regadío de la citada zona. La longitud del curso principal es de unos 156 km y tiene una aportación media de la cuenca de 380 hm³/año. En cuanto a la infraestructura de almacenamiento, la cuenca cuenta con tres embalses: el de mayor capacidad es el de Arenós (95 hm³ útiles); aguas abajo se encuentra el embalse de Schar (49 hm³), y ubicado en el afluente "Rambla de la Viuda", el de María Cristina (19.7 hm³).

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

Previamente a la aplicación del método que se explica en este artículo, se ha creado un modelo de simulación

representativo del sistema del Mijares. Para ello se ha utilizado el programa *SIMGES* del sistema de ayuda a la decisión *AQUATOOL*. La ilustración 5 muestra la topología del modelo de simulación desarrollado.

Como se puede ver en la ilustración 5, el modelo consta de un curso principal que representa al río Mijares, en donde se ubican los embalses de Arenós (E. Arenós) y Sichar (E. Sichar). El significado de los diferentes símbolos puede verse en la ilustración 2. El otro río considerado es el afluente "La Rambla de la Viuda", en el que se ubica el embalse de María Cristina (E. Ma. Cristina).

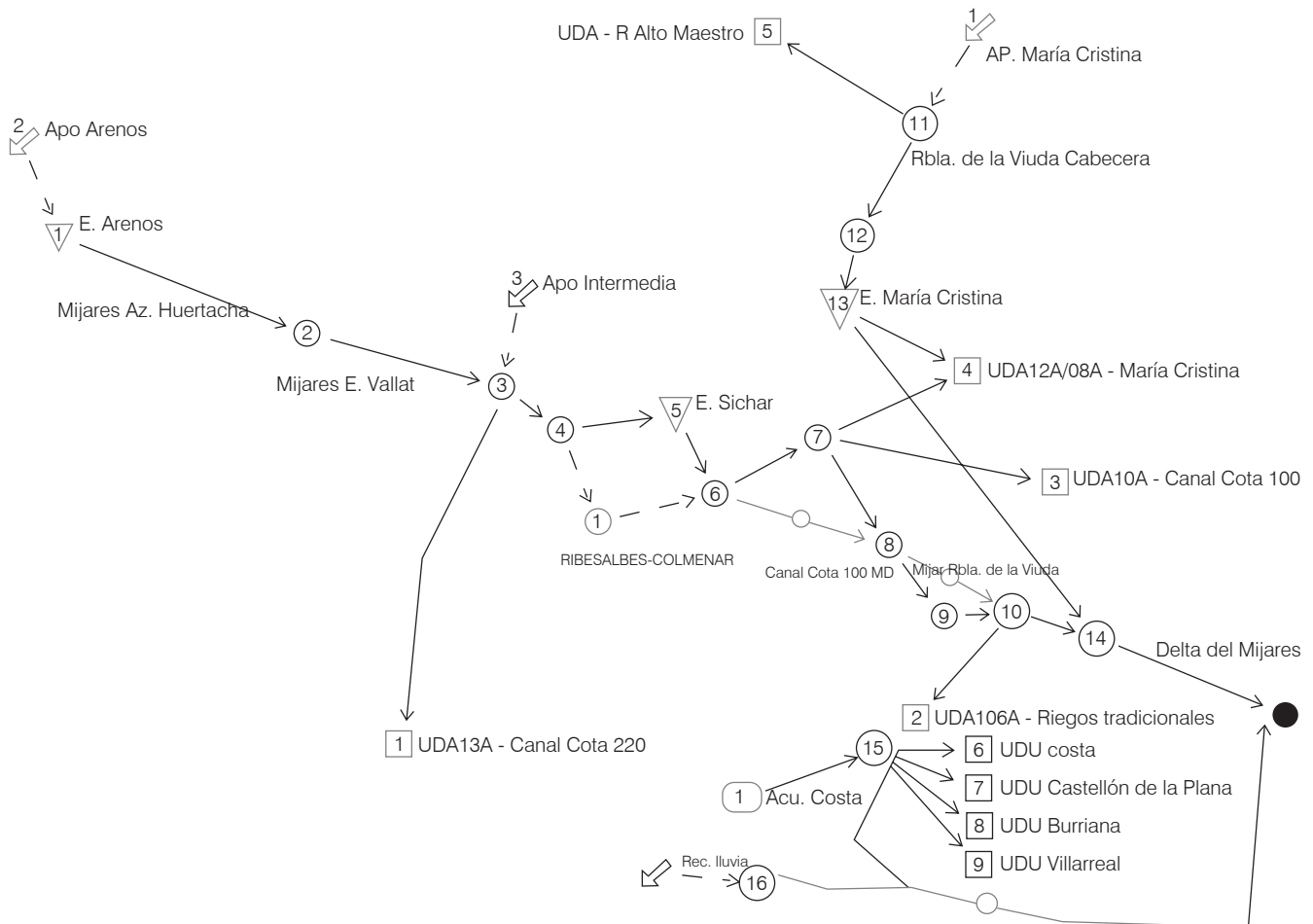
Las aportaciones consideradas son el aporte de la cuenca aguas arriba del embalse de Arenós (Ap. Arenós), el aporte de la cuenca media del río Mijares (Ap. intermedia) y el aporte de la cabecera de La Rambla de la Viuda (Ap. María Cristina).

Los riegos del sistema se tienen en cuenta en el modelo con cuatro elementos de demanda: "UDA-

Riegos Tradicionales", "UDA-Riegos Canal Cota 220", "UDA-Riegos Canal Cota 100" y "UDA-María Cristina". Los suministros urbanos se consideran mediante las demandas: "UDU-Costa", "UDU-Castellón de la Plana", "UDU-Burriana" y "UDU-Villarreal". Estas demandas se suministran del acuífero "Acu Costa". Este elemento acuífero permite modelar el acuífero de la Plana de Castellón. La infraestructura de suministro a estas poblaciones se ha modelado mediante un elemento bombeo adicional del acuífero y un conjunto de tomas del nudo donde finaliza el bombeo adicional.

El acuífero se ha simulado mediante un modelo de tipo unicelular. Este modelo, aunque de una formulación muy simple, permite reflejar en el modelo de uso conjunto las consecuencias de las diferentes reglas de operación ensayadas. El modelo permite el manejo de dos parámetros de control: el volumen almacenado y el caudal de salida del acuífero. La variable volumen se calcula como valor relativo con respecto a un

Ilustración 5. Topología del modelo de simulación desarrollado para la cuenca del río Mijares.



valor 0, para el cual no habría avance de la intrusión salina; de esta forma, valores negativos de volumen suponen un aumento de la intrusión salina y valores positivos un retroceso de ésta (el acuífero se encuentra desconectado hidráulicamente del río). Previamente se había estimado la recarga del acuífero por lluvia mediante un modelo de precipitación escorrentía *PATRICAL* (Pérez Martín, 2005). Se incluye una regla de operación que consiste en la limitación del bombeo del acuífero cuando el valor negativo del volumen en el acuífero supera un límite máximo permitido, que ha sido ajustado mediante la comparación con episodios de sequía históricos de los que se conocen datos sobre problemas causados por intrusión salina.

Para definir la gestión de los embalses se ha considerado el embalse de Arenós prioritario frente a los otros dos embalses de igual prioridad. Además, se han calibrado unas curvas objetivo de los embalses para que representen la gestión real actual de los embalses.

En cuanto a las demandas, el orden de prioridad es el siguiente: en primer lugar, todas las demandas urbanas; en segundo, la demanda agrícola de riegos tradicionales, y finalmente, todas las demandas de riego restantes. En cuanto a los retornos a partir de datos aforados, evapotranspiración potencial y de diferentes estudios realizados sobre riegos tradicionales similares, se estima que los regadíos tradicionales retornan el 50% del agua demanda.

Se han considerado las filtraciones del embalse de Sichar, las filtraciones de la parte baja del río y la recarga del acuífero por los sobrantes de riego de todas las demandas. Los caudales ecológicos de la cuenca se han incluido como caudales mínimos en las conducciones aguas abajo de los embalses. Finalmente, también se ha tenido en cuenta la central hidroeléctrica de Ribesalbes-Colmenar, en la cual se ha establecido un caudal objetivo nulo, ya que sólo se le permite turbinar excedentes. Existen más centrales hidroeléctricas a lo largo del curso del río que no ha sido necesario incluir en el modelo porque no afectan a la disponibilidad del recurso.

Simulaciones

Una vez desarrollado el modelo de simulación de la cuenca, se dispone de una herramienta que representa nuestro sistema de recursos hídricos y que permite analizar el impacto de diferentes alternativas sobre los diferentes elementos del sistema.

En este caso en concreto, en la cuenca del Mijares se plantea estudiar dos aspectos: el primero

es el análisis de una regla de gestión que proteja los derechos de los riegos tradicionales frente a los riegos mixtos; por otro lado, se pretende analizar la afección sobre el sistema de las nuevas actuaciones que se van a realizar en la cuenca, consistentes en la modernización de los regadíos tradicionales y en la construcción de la infraestructura necesaria para el suministro superficial de la ciudad de Castellón desde el embalse de Sichar. Todo ello se ha traducido en tres simulaciones del modelo desarrollado. Para las simulaciones se ha utilizado un conjunto de series de aportaciones históricas, obtenidas por restitución a régimen natural, con inicio en octubre de 1940 y fin en septiembre de 2003.

De las múltiples variables que se obtienen como resultado de las simulaciones del modelo, es necesario seleccionar las más significativas para evaluar nuestros objetivos. Los cuadros 1 a 4 recogen el conjunto de variables seleccionado para este caso. En el cuadro 1 se muestran, para cada una de las simulaciones, diferentes variables relacionadas con los déficits sufridos por las demandas de riegos tradicionales. Se define como déficit la diferencia entre la cantidad de agua demandada y la suministrada. Este cuadro recoge los máximos déficits ocurridos en cada simulación para esa demanda en un periodo de uno, dos o diez años consecutivos. Se expresa en valor absoluto (hm^3) y en porcentaje en relación con el valor de la demanda anual. Además, se adjuntan los déficits máximos y medios mensuales de la demanda.

El cuadro 2 muestra las mismas variables para el conjunto de riegos modernos que engloban las demandas "Canal Cota 100", "Canal Cota 220" y "Riegos de María Cristina". En el cuadro 3 se recoge, para cada una de las simulaciones realizadas, los diferentes valores de volúmenes, bombeos y recarga neta del acuífero. Finalmente, el cuadro 4 muestra el número de vaciados y el volumen medio de final de la campaña de los diferentes embalses y del conjunto de ellos.

Simulación base

Se realiza una primera simulación del sistema, en donde se limitan los bombeos de los riegos mixtos y no se aplica ninguna regla de operación. A esta simulación se le ha denominado *CBSRO* (Controlando los Bombeos y sin Regla de Operación). Para traducir esta situación en el modelo, en las demandas agrarias modernas se ha limitado el uso del bombeo cuando el volumen del acuífero es inferior a -50 hm^3 . El bombeo de las demandas urbanas no se ha limitado, ya que no se dispone de ninguna otra fuente de recursos. La ilustración 6 muestra

Cuadro 1. Resultados de déficit de la demanda “riegos tradicionales”.

Riegos tradicionales								
	Máx. déf. un año		Máx. déf. dos años		Máx. déf. diez años		Máx. déf. mensual	Déficit medio mensual
Simulación	hm ³	%DA	hm ³	%DA	hm ³	%DA	hm ³	hm ³
CBSRO	22.52	26.97	36.10	43.22	100.80	120.67	11.68	0.09
CBCRO	20.64	24.71	22.84	27.35	63.59	76.12	11.68	0.09
NUEVACT	15.34	24.48	15.98	25.51	36.15	57.70	8.79	0.15

Cuadro 2. Resultados de déficit del conjunto de demandas: riegos Canal Cota 100; riegos Canal Cota 200 y riegos María Cristina.

Riegos modernos								
	Máx. déf. un año		Máx. déf. dos años		Máx. déf. diez años		Máx. déf. mensual	Déficit medio mensual
Simulación	hm ³	%DA	hm ³	%DA	hm ³	%DA	hm ³	hm ³
CBSRO	46.26	61.43	73.82	98.04	177.83	236.16	16.56	0.68
CBCRO	57.85	76.82	88.37	117.35	196.92	261.52	16.56	0.79
NUEVACT	70.98	94.26	115.56	153.46	245.81	326.44	16.56	0.93

Cuadro 3. Resumen de los resultados obtenidos para el acuífero.

Resultados del acuífero	Volumen (hm ³)		Bombeo (hm ³)		Recarga neta (hm ³)
	Mínimo	Promedio	Máximo	Promedio	Promedio
CBSRO	-75.47	-6.12	27.96	7.04	4.78
CBCRO	-67.69	-5.03	27.96	7.28	4.69
NUEVACT	-71.04	-7.34	24.87	5.43	4.63

Cuadro 4. Resumen de los resultados obtenidos para los embalses.

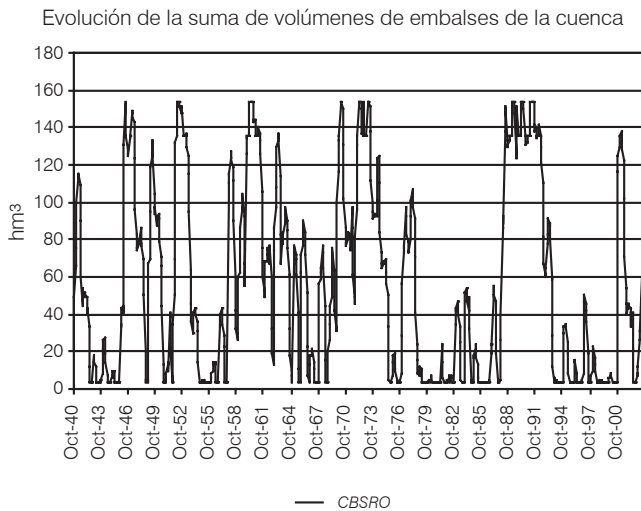
Resultados de los embalses	Emb. Arenós		Emb. Sichar		Emb. Ma. Cristina		Conjunto emb.	
	Núm. vaciados	Volumen promedio mes octubre (hm ³)	Núm. vaciados	Volumen promedio mes octubre (hm ³)	Núm. vaciados	Volumen promedio mes octubre (hm ³)	Núm. vaciados	Volumen promedio mes octubre (hm ³)
CBSRO	189	21.63	306	13.97	291	2.45	160	38.05
CBCRO	61	25.50	243	14.72	295	2.45	47	42.67
NUEVACT	9	26.86	243	14.71	299	2.47	7	44.04

la evolución de la suma de los volúmenes embalsados en las tres represas.

Como se puede ver en la ilustración 6, existe un pequeño primer periodo seco a principio de los años cuarenta, pero los periodos de sequía operativa más pronunciados se producen en la década de los ochenta y los noventa. Esto repercute en el suministro de las demandas. Como se puede ver en el cuadro 1, el máximo déficit durante diez años consecutivos para la

demanda de riegos tradicionales es del 120%. Por otra parte, los riegos modernos presentan una baja fiabilidad de suministro, con valores del 236% de la misma variable comentada. En la realidad, esta falta de recurso para satisfacer los riegos modernos se ha traducido, históricamente, en una sobreexplotación del acuífero de la Plana de Castellón. Por su parte, las demandas urbanas no sufren ningún tipo de déficit, al no tener ningún tipo de restricción en el bombeo.

Ilustración 6. Evolución del volumen embalsado total en la simulación básica CBSRO.



Regla de operación para los riegos tradicionales

Con el método heurístico propuesto se ha estimado una curva de operación para el conjunto de los embalses de Arenós y Sichar, que permite proteger los derechos de la demanda de los riegos tradicionales frente a los riegos mixtos. Para la aplicación del método sólo cabe definir el grado de garantía y protección que se quiere dar a la demanda de riegos tradicionales. Siguiendo las indicaciones de la Orden Ministerial (MOPT, 1992), se escoge la garantía tipo Utah-Dwr (Lall y Millar, 1988) como el criterio de suministro de la demanda. Este criterio, basado en el establecimiento de límites para los máximos déficits que se pueden producir en periodos de tiempo de determinada duración, proviene de los utilizados por el U.S. Bureau of Reclamation (USBR) y la Utah Division of Water Resources (UDWR) (Estrada, 1993). En concreto, los periodos escogidos son de uno, dos y diez años, y los umbrales de cumplimiento para estos periodos son del 50, 75 y 100% de la demanda anual. De esta forma se considera que el suministro a la demanda es "satisfactorio" siempre y cuando el máximo déficit anual de la serie simulada sea inferior al 50% de la demanda anual, el máximo déficit acumulado de dos años consecutivos sea inferior al 75% de la demanda anual y el máximo déficit acumulado de diez años consecutivos sea inferior al 100% de la demanda anual.

La simulación se ha denominado *CBCRO* (Simulación Controlando Bombeos y con Regla de Operación). Esta "curva de operación" estimada se crea en el modelo como un indicador de alarma. Además, en las tomas de los riegos modernos se debe fijar este indicador

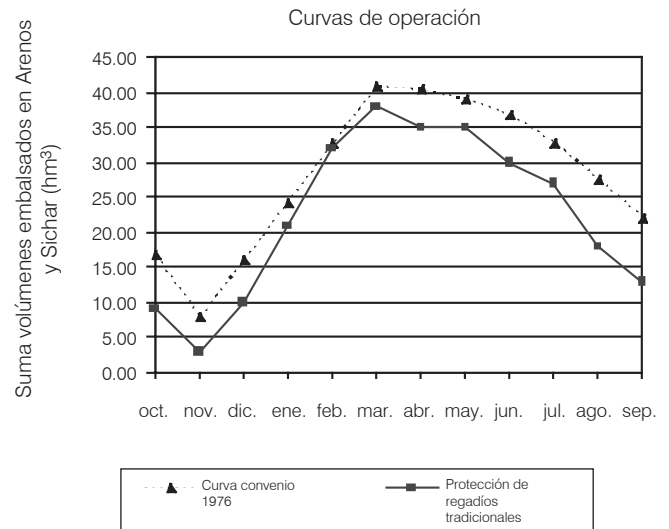
de alarma. De esta forma, cuando la suma de los volúmenes de los embalses de Arenós y Sichar sea inferior a la curva calculada, se restringen los posibles suministros superficiales de las demandas agrarias modernas. Así, el agua superficial remanente garantiza el suministro de la demanda agraria tradicional. La curva obtenida se puede ver en la ilustración 7, junto con la curva definida por el convenio de 1973. Como se puede ver, la curva estimada es bastante similar a la estimada por los usuarios hace más de treinta años. Cabe decir que la nueva curva permite un mejor aprovechamiento del recurso.

Comparándola con la situación en donde no se impone ninguna regla de gestión, esta gestión tiene como consecuencia una mejora de los déficits de la demanda tradicional a costa de un empeoramiento de los de las demandas modernas. En particular, se mejoran significativamente los porcentajes de máximos déficits a dos y diez años consecutivos, pasando de 43.22 a 27.35, y de 120.67 a 76.12, respectivamente.

El efecto sobre la demanda de riegos modernos se puede ver sobre todo en el máximo déficit de dos años consecutivos. En porcentaje, este valor pasa de 98.04 sin regla de operación a 117.35 con regla.

Como se puede ver, los resultados reflejan un sistema llevado al límite de sus posibilidades de uso del recurso, con demandas agrarias que pueden tener déficit del orden del 76.82% de su demanda anual. Estos déficits en la realidad sólo se pueden suplir con una sobreexplotación del acuífero en esos años o con las consecuentes pérdidas económicas.

Ilustración 7. Curva de operación obtenida para la protección de los regadíos tradicionales frente a los mixtos.



Nuevas actuaciones

En la actualidad se está realizando una gran inversión para la modernización de los regadíos tradicionales, muy deficientes en sus sistemas de riego, así como en crear una toma de abastecimiento de la ciudad de Castellón desde el embalse de Schar. Esta toma mejorará la actualmente muy mermada calidad del agua del suministro a esta población. En cuanto a la modernización, estudios previos específicos han estimado una reducción de la demanda a 62 hm³ y una disminución del coeficiente de retorno del 0.5 a 0.3. Estos estudios se basan en zonas similares de cuencas próximas, en donde ya se ha aplicado una modernización similar. Para considerar estos aspectos se ha realizado la simulación denominada *NUEVACT* (Simulación Nuevas Actuaciones sobre el Sistema). La modificación del modelo para tener en cuenta esta situación es inmediata, modificando la cantidad de agua demandada y su coeficiente de consumo (y, por consiguiente, el de retorno). Para tener en cuenta el abastecimiento a la "UDA de Castellón" se crea en el modelo una nueva toma desde el embalse de Schar y se elimina la toma que se alimentaba del bombeo adicional.

Frente a esta nueva situación es necesario estimar una curva de operación para proteger el abastecimiento superficial urbano frente a los regadíos. Para ello se aplica de nuevo el método propuesto, pero en este caso la demanda a proteger es la demanda urbana. Los umbrales de garantía también se modifican, siendo mucho más restrictivos: 10, 15 y 30%, para uno, dos y diez años, respectivamente. La curva obtenida se representa en la ilustración 8, conjuntamente con la estimada para la protección de los regadíos tradicionales. Esta nueva curva se aplica como restricción para la demanda de riegos tradicionales.

Con la modernización de los regadíos, la demanda tradicional reduce en aproximadamente un tercio sus necesidades, por lo que es más fácil su suministro y se reducen los déficits de la misma. La ilustración 9 muestra la comparación de los déficits anuales de la demanda "Riegos tradicionales" para las simulaciones *CBCRO* y *NUEVACT* para los últimos 25 años de la simulación, siendo éste el periodo más seco de la serie. En ella se puede ver el efecto de la modernización de los regadíos sobre los riegos tradicionales.

Aunque a priori se pudiese pensar que la disminución del recurso requerido por la demanda tradicional implicaría una situación más ventajosa para los riegos modernos, en la realidad las simulaciones realizadas indican un ligero empeoramiento de su situación.

Ilustración 8. Curvas de operación obtenidas para la protección de los regadíos y del suministro de Castellón.

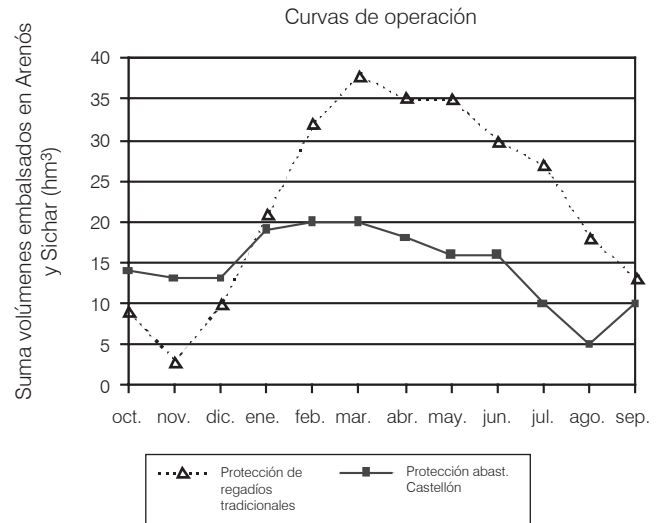
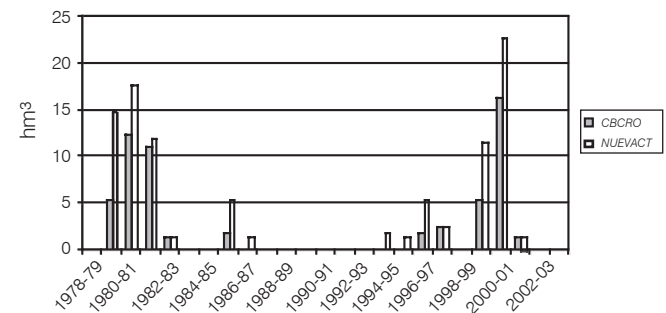


Ilustración 9. Déficits anuales para los últimos 25 años, obtenidos como resultado de las simulaciones *CBCRO* y *NUEVACT*.

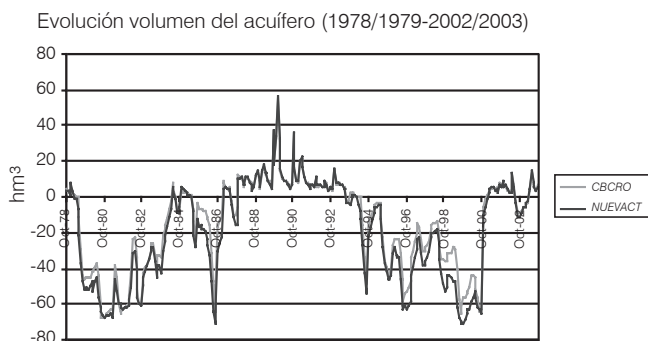
Déficit anual de la demanda tradicional (1978/1979-2002/2003)



Esto se debe, sobre todo, a la disminución de la recarga del acuífero que se producía por los sobrantes de los regadíos de baja eficiencia en el riego. La ilustración 10 compara, para los últimos 25 años de simulación, la evolución del volumen del acuífero para ambas alternativas. En ella se puede ver una ligera reducción en la alternativa *NUEVACT* de los volúmenes del mismo en épocas de sequía.

Por otro lado, la demanda urbana de abastecimiento a la ciudad de Castellón pasa a tener algún déficit en los años de sequía cuando antes esto no se producía. Esto se debe a que en la situación inicial, el bombeo para suministro no se limitaba, por lo que las simulaciones anteriores no presentaban déficit. En la nueva situación, la demanda debe competir con los riegos. Para su

Ilustración 10. Estimación del volumen del acuífero en los últimos 25 años, para las simulaciones CBCRO y NUEVACT.



protección se ha creado la curva antes mencionada, pero debido los umbrales manejados, las simulaciones presentan pequeños déficits en algunos años. Para esta simulación, los déficits máximos a uno, dos y diez años son 4.27, 4.27 y 7.36% sobre la demanda anual (25 hm³).

En definitiva, el modelo muestra que las nuevas actuaciones producen una mejora en la garantía de suministro de la demanda tradicional por reducir sus necesidades, pero que por otro lado se disminuye la recarga del acuífero producida por los sobrantes del riego. Esto afecta tanto al volumen del acuífero como al recurso subterráneo disponible para los otros usos. Asimismo, el ejemplo muestra la complejidad de las relaciones de los sistemas reales y cómo estas herramientas pueden ayudar a conocer más el sistema y a descubrir los efectos de las diferentes actuaciones que se producen sobre el mismo.

Conclusiones

El método de obtención de curvas de gestión que se ha propuesto y aplicado presenta la ventaja de que, aunque las reglas que se obtienen representan una pérdida de eficiencia del sistema frente a la situación teórica de la regla de operación óptima, se protege el sistema de derechos establecido, permitiendo que sea aceptada por los usuarios para tomar decisiones en la gestión real. El método heurístico desarrollado necesita de un modelo de simulación como base del proceso de iteración, teniendo que ser lo más representativo de la realidad. Para ello, la herramienta *SIMGES* es un programa que permite modelar sistemas de recursos hídricos de una forma completa y teniendo en cuenta tanto las aguas superficiales como las subterráneas y sus relaciones.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer al Ministerio de Educación y Ciencia de España por su apoyo económico mediante el proyecto CGL2005-07229/HID "Sistema de apoyo a la decisión en planificación de cuencas hidrográficas para la adaptación a la directiva marco comunitaria en materia de aguas". Este proyecto ha sido financiado parcialmente con fondos FEDER de la Unión Europea.

Recibido: 11/10/2006
Aprobado: 04/09/2007

Referencias

- ANDREU, J., CAPILLA, J. and SANCHÍS, E. AQUATOOL: a generalized decision support-system for water-resources planning and operational management. *Journal of Hydrology*. Vol. 177, 1996, pp. 269-291.
- ANDREU, J., CAPILLA, J. y FERRER, J. Modelo *SIMGES* de simulación de la gestión de esquemas de recursos hídricos, incluyendo utilización conjunta. Valencia: Servicio de Publicaciones, UPV, 1992, pp. 230.
- ANDREU, J. and SAHUQUILLO, A. Efficient aquifer simulation in complex systems. *J. Water Resour. Plannig Manage.* Vol. 113, no. 1, 1987, 20 pp.
- BHASKAR, N.R. and WHITLACH Jr., E.E. Deriving of monthly reservoir release policies. *Water Resources Research*. Vol. 16, no. 6, 1980, pp. 987-993.
- BOWER, B.T., HUFSCHEMIDT, M.M. and REEDY, W.H. Operation procedures: Their role in the design and implementation of water resource systems by simulation analysis. *Design of Water Resource Systems*. Chap. 11. Maass, A. et al., editor. Cambridge: Harvard University Press, 1962, pp. 443-458.
- CHJ. *Convenio de Bases para la Ordenación de las Aguas del río Mijares. Reglamento del Sindicato Central de Regantes del Río Mijares*. Júcar, España: Confederación Hidrográfica del Júcar, Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, 1973.
- CLARK, E.J. Impounding reservoirs. *J. Am. Water Works Assoc.* Vol. 48, no. 4, 1956, pp. 349-354.
- ESTRADA, F. *La garantía en los sistemas de explotación de recursos hidráulicos*. Tesis doctoral. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, 1993.
- FORD, C.R. and FULKERSON, D.R. *Flow in networks*. Princeton: Princeton University Press, 1962, p. 194.
- HASHIMOTO, T., STEDINGER, J.R. and LOUCKS, D.P., Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resources Research*. Vol. 18, no. 1, February 1982, pp. 14-20.

- JOHNSON, S.A., STEDINGER, J.R. and STASCHUS, K. Heuristic operating policies for reservoir system simulation, *Water Resour. Research*. Vol. 27, no. 5, 1991, pp. 673-685.
- KARAMOUZ, M., SZIDAROUSKY, F. and ZAHRAIRE, B. *Water Resources system Analysis*. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers, CRC Press, 2000, 579 pp.
- LABADIE, J., Optimal Operation of Multireservoirs Systems: State-of-the-Art Review. *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol 130, no. 2, 2004, March 1, 2004.
- LALL, U. and MILLAR, C.W. An optimization Model for Screening Multipurpose Reservoir Systems. *Water Resour. Res.* Vol. 24, no. 7, 1988, pp 953-968.
- LOUCKS, D.P. and Sigvaldason, O.T. Multiple reservoir operation in North America. In *The Operation of Multiple Reservoir Systems*. Kaczmarck, Z. and Kindler, J. (editors). IIASA Collab. Proc. Ser., 1982, CP-82-53, pp 1-103.
- LUND, J., and FERREIRA, I. Operating rule optimization for Missouri River reservoir system. *J. Water Resour. Plan. Manage.* Vol. 122, no. 4, 1996, pp. 287-295.
- MMA. Orden de 24 de septiembre de 1992, por el que se aprueban las instrucciones y recomendaciones técnicas complementarias para la elaboración de los Planes Hidrológicos de Cuencas Intercomunitarias. Ministerio de Obras Públicas y Transportes. BOE de 16 de octubre de 1992.
- MMA. Orden de 13 de agosto de 1999, por el que se dispone la publicación de las determinaciones de contenido normativo del Plan Hidrológico de cuenca del Tajo, aprobado por el Real Decreto 1664/1998, de 24 de julio. BOE de 30 de agosto de 1999.
- MMA. Convenio específico sobre el embalse de Alarcón para la gestión optimizada y unitaria del sistema hidráulico Júcar (Alarcón Contreras y Tous) celebrado entre el Ministerio de Medio Ambiente y la Unión Sindical de Usuarios del Júcar USUJ, de julio de 2001.
- PÉREZ-MARTÍN, M.A. Modelo distribuido de simulación del ciclo hidrológico y calidad del agua, integrado en sistemas de información geográfica para grandes cuencas. Aportación al análisis de presiones e impactos de la directiva marco del agua. Tesis doctoral. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2005.
- WURBS, R. Reservoir-system simulation and optimization models. *J. Water Resour. Plan. Manage.* Vol. 119, no. 4, 1993, pp. 455-472.
- YEH, W. Reservoir management and operations models: A state-of-the-art review. *Water Resour. Res.* Vol. 21, no. 12, 1985, pp 1797-1818.
- YOUNG, G. Finding reservoir operating rules. *J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng.* Vol. 93, no. 6, 1967, 297-321.

Abstract

PAREDES-ARQUIOLA, J., SOLERA-SOLERA, A. & ANDREU-ÁLVAREZ, J. Operation rules for multireservoir systems combining heuristic methods and flow networks. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. XXIII, no. 3, July-September, 2008, pp. 151-164.

Developing operation rules for multireservoir systems has been widely studied by optimization and simulation techniques. In this paper, a heuristic approach is presented. This approach allows to obtain rule curves for multireservoir systems. This method is based on searching the minimum necessary volume, defining the inflows and the system, for maintaining a chosen degree of reliability for one or several demands. SIMGES model of the Decision Support System AQUATOOL is used as simulation model for the iterative process. The approach presented here is applied to the Mijares River basin, a water resources system located in eastern Spain. This basin is characterized by severe droughts, a water rights system very deeply rooted amongst users, and the possibility of a joint use of surface- and groundwater resources.

Keywords: reservoir management, simulation, AQUATOOL, SIMGES, operation rules, multireservoir systems, rule curves, heuristic optimization

Dirección institucional de los autores:

Dr. Javier Paredes-Arquiola

Profesor-colaborador
Universidad Politécnica de Valencia
Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente
Camino de Vera s/n
46022 Valencia, España
teléfono: + (34) (963) 879 892
Fax: + (34) (963) 879 618
jparedea@hma.upv.es

Dr. Abel Solera-Solera

Profesor titular de escuela universitaria
Universidad Politécnica de Valencia
Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente
Camino de Vera s/n
46022 Valencia, España
teléfono: + (34) (963) 879 612
Fax: + (34) (963) 879 618
asolera@upvnet.upv.es

Dr. Joaquín Andreu-Álvarez

Catedrático de universidad
Director técnico de Confederación Hidrográfica del Júcar
Universidad Politécnica de Valencia
Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente
Camino de Vera s/n
46022 Valencia, España
teléfono: + (34) (963) 938 909
Fax: + (34) (963) 879 618
ximoand@upvnet.upv.es