

Comparativa de algoritmos para la optimización de un sistema de recursos hídricos

• Néstor Lerma* • Javier Paredes-Arquiola • Joaquín Andreu • Abel Solera •
Universitat Politècnica de València, España

*Autor de correspondencia

Resumen

Lerma, N., Paredes-Arquiola, J., Andreu, J., & Solera, A. (mayo-junio, 2015). Comparativa de algoritmos para la optimización de un sistema de recursos hídricos. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(3), 79-92.

De manera tradicional, las técnicas de obtención de reglas de gestión (RG) en sistemas multiembalse han consistido en emplear modelos de simulación que permiten evaluar el comportamiento del sistema una vez definida dicha RG. Se trata de un proceso largo y repetitivo hasta encontrar la RG apropiada. El objetivo de este artículo es comparar dos algoritmos evolutivos empleados para la obtención de RG. Para ello, se ha desarrollado una metodología que acopla los algoritmos evolutivos con redes de flujo. Estas últimas permiten la simulación de la gestión de un sistema a partir de la definición de unas RG, y los algoritmos evolutivos son los que se encargan de ir modificando dichas reglas y controlando las sucesivas simulaciones. Los algoritmos comparados son el *SCE-UA* y el *Scatter Search*, mientras que la red de flujo empleada es el módulo *SIMGES*, que forma parte del Sistema Soporte de Decisión *AQUATOOL*. La metodología propuesta se aplica al sistema de explotación Tirso-Flumendosa-Campidano ubicado en la isla de Cerdeña, Italia. El sistema se identifica con un clima mediterráneo, caracterizado por la irregularidad en la aparición del recurso hídrico y de la demanda, por lo que este tipo de sistemas se considera como uno de los más complejos de gestionar. Los resultados obtenidos muestran que la metodología planteada y, por tanto, los algoritmos evolutivos (unos más apropiados que otros) permiten obtener RG óptimas. En este estudio, las RG obtenidas permiten disminuir el número de demandas con déficit y los costes de bombeo respecto a la gestión actual.

Palabras clave: algoritmos evolutivos, sistema de recursos hídricos, *AQUATOOL*, *SIMGES*, gestión, optimización, Mediterráneo, reglas de operación.

Abstract

Lerma, N., Paredes-Arquiola, J., Andreu, J., & Solera, A. (May-June, 2015). Comparison of Algorithms for the Optimization of Water Resources Systems. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 6(3), 79-92.

Techniques to obtain operating rules (OR) for multi-reservoir systems have consisted of using simulation models to evaluate the behavior of the system after the OR has been defined. This is a long and repetitive process lasting until the appropriate OR is found. The objective of the article herein is to compare two evolutionary algorithms used to obtain the OR. To this end, a methodology has been developed which combines evolution algorithms with flow networks. The latter are used to simulate the management of a system based on the definition of some of the OR, and evolutionary algorithms modify these rules and control successive simulations. The *SCE-UA* and *Scatter Search* algorithms were compared and the *SIMGES* flow network module was used, which is part of the *AQUATOOL* Decision Support System. The methodology proposed was applied to the Tirso-Flumendosa-Campidano system on the Island of Cerdeña, Italy. This system is located in a Mediterranean climate characterized by changes in the availability and demand of the resource. This type of system is considered to be among the most complex to manage. The results obtained show that optimal OR can be obtained with the proposed methodology, and thus using the evolutionary algorithms (one more appropriate than the others). The OR obtained by this study resulted in lower deficit-related demands and pumping costs than with the current management.

Keywords: Evolutionary algorithms, Water System, *AQUATOOL*, *SIMGES*, Management, Optimization, Mediterranean, Operating Rules.

Introducción

La planificación hidrológica es uno de los instrumentos fundamentales para la gestión integral del recurso hídrico, donde las reglas de gestión (RG) son algunas de las estrategias empleadas para mejorar el aprovechamiento de dichos recursos, intentando, a su vez, paliar los efectos adversos de las sequías hidrológicas que se presentan a lo largo del tiempo y del espacio.

La herramienta más utilizada para el análisis y la planificación de los sistemas de recursos hídricos son los modelos de simulación. Éstos se caracterizan por su flexibilidad y capacidad para contener elementos muy complejos en la modelización. Además, permiten una representación más detallada de los sistemas que los modelos de optimización (Loucks & Sigvaldason, 1982). Asimismo, la aplicabilidad de los modelos de optimización a la mayoría de los modelos de gestión de embalses es limitada debido al “alto grado de abstracción” necesaria para la eficiente aplicación de técnicas de optimización (Akter & Simonovic, 2004; Moeini, Afshar, & Afshar, 2010). En general, la gestión de las cuencas se realiza mediante el apoyo de modelos de simulación. Esto no impide que para un paso de la simulación (p. ej., el mes), se empleen técnicas de optimización (como las redes de flujo) para optimar el reparto del recurso entre los distintos usuarios, y la procedencia del recursos entre las distintas fuentes o masas de agua.

Por lo general, estos modelos de simulación requieren el establecimiento predeterminado de la forma de gestión del sistema. El diseño y obtención de RG para sistemas multiembalse ha sido un tema muy desarrollado a lo largo de la historia científica de los recursos hídricos. Por ejemplo, a partir de los resultados de los modelos de optimización empleando regresiones lineales (Young, 1967), regresiones lineales múltiples (Bhaskar & Withlach, 1980), y sencillas estadísticas, tablas y diagramas (Lund & Ferreira, 1996). Desafortunadamente los análisis de regresión pueden dar resultados muy pobres en sus correlaciones invalidando las RG obtenidas (Labadie, 2004). Otro tipo de RG son las heurís-

ticas, como la regla del espacio vacío (Bower, Hufschmidt, & Reedy, 1982) o la regla de la ciudad de Nueva York (Clark, 1956), las cuales 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, Stedinger, & Staschus, 1991). También existen las “curvas de embalse”, que han sido criticadas por algunos autores por no ser las RG más eficientes posibles (Karamouz, Szidarousky, & Zahraire, 2000); sin embargo, la gestión real de los sistemas se suele realizar con este tipo de reglas debido a su fácil aplicación y entendimiento.

Una técnica habitual para la obtención de RG se basa en emplear los modelos de simulación de cuencas. Se simula una vez por cada RG que se quiera analizar, definiendo sus parámetros y comprobando su comportamiento en la gestión del sistema. El objetivo es encontrar aquella RG que optimice la gestión del sistema. El conjunto de pruebas necesarias para obtener esa RG óptima puede ser muy importante, por lo que todas esas iteraciones pueden ser controladas por un algoritmo de optimización, encargado de variar los parámetros de la RG con base en los resultados que se vayan obteniendo del modelo de simulación. Dicho procedimiento es el que se plantea en este artículo, empleando algoritmos evolutivos como algoritmos de optimización. Los algoritmos evolutivos se caracterizan por su flexibilidad en la adaptación a cualquier tipo de problemas y por evitar los óptimos locales mejor que los algoritmos de gradiente. Se basan en la teoría de la evolución, por lo que hacen evolucionar una población de individuos sometiéndola a procesos similares a los que actúan en la evolución biológica, así como en una selección en función de cuáles son los individuos más aptos —que sobreviven— y cuáles los menos —que son descartados—.

Nicklow *et al.* (2010) recopilan el estado del arte de los algoritmos evolutivos aplicados a la planificación y gestión de recursos hídricos. Casos concretos son su aplicación en los sistemas de distribución de agua (Goldberg & Kuo,

1987); en drenaje urbano y alcantarillado (Guo, Walters, & Savic, 2008); para suministro de agua y tratamiento de aguas residuales (Murthy & Vengal, 2006); para aplicaciones en modelos hidrológicos y fluviales (Muleta & Nicklow, 2005), o en sistemas de aguas subterráneas (Dougherty & Marryott, 1991).

Para el caso concreto de las RG, Oliviera y Loucks (1997), y luego Ahmed y Sarma (2005), presentan un enfoque para la optimización de las normas de operación para sistemas multiembalse usando algoritmos evolutivos. Casos de aplicación más recientes son el trabajo de Cai, McKinney, & Lasdon (2001), para resolver modelos no lineales de gestión del agua utilizando una combinación de un algoritmo evolutivo y la programación lineal, o Elferchichi, Gharsallah, Nouri, Lebsi y Lamaddalena (2009), que aplicaron un algoritmo evolutivo para optimar la operación de los embalses en un sistema de riego a la carta que se aplicó al régimen de riego de Sinistra Ofanto, en Foggia, Italia.

En este artículo, a diferencia de otros estudios que optimizan RG empleando algoritmos evolutivos, se acopla éstos con las redes de flujo. La red de flujo es una de las técnicas más eficientes computacionalmente en la programación lineal y, como demostró Kuczera (1989 y 1993), es más adecuada que ésta para resolver grandes sistemas multiembalse como el que se analiza en el presente artículo. Por tanto, la metodología se plantea con el objetivo de comparar dos algoritmos evolutivos a la hora de buscar RG óptimas en sistemas multiembalse, acoplándolos con una red de flujo. La red de flujo utilizada es el módulo de simulación de la gestión *SIMGES*, que forma parte del Sistema Soporte a la Decisión (SSD) *AQUATOOL*. Por su parte, los algoritmos evolutivos analizados son el *SCE-UA* y el *Scatter Search* (búsqueda dispersa).

La comparación de algoritmos evolutivos se ha desarrollado aplicando la metodología al sistema de explotación Tirso-Flumendosa-Campidano ubicado en la isla de Cerdeña, Italia. Este sistema se identifica con un clima mediterráneo, y está caracterizado por la irregularidad en la aparición del recurso hídrico y de la demanda,

por lo que es uno de los sistemas de recursos más complejos de gestionar. En mayor medida, al tratarse de un sistema insular en el cual la escasez del recurso es mayor, el principal objetivo en la optimización de la gestión de este sistema consiste en reducir los costes de bombeo, al mismo tiempo que se minimizan los déficits de las demandas.

Sistema de estudio

La isla de Cerdeña se encuentra en el mar Mediterráneo, entre la península Ibérica e Itálica (figura 1), y cubre un área aproximada de 24 000 km², con una población de 1 648 000 habitantes. El clima de Cerdeña se clasifica por lo general como mediterráneo, con inviernos suaves y relativamente húmedos, y veranos secos y cálidos.

El sistema de suministro de agua se caracteriza principalmente por el uso de agua superficial almacenada y regulada por los embalses. Estos embalses cumplen también la tarea de protección contra inundaciones y, en algunos casos, de producción de energía hidroeléctrica. El agua subterránea se utiliza sólo para pequeños requerimientos locales. La zona presenta un gran número de sistemas de bombeo y conducciones para transportar el agua desde los embalses hasta los puntos de suministro. Un objetivo relevante en su gestión consiste en reducir el coste de dichos bombeos, minimizando al mismo tiempo los déficits de las demandas.

Cerdeña se divide en siete sistemas interconectados, de los cuales, los cuatro del más al sur son los que conforman el sistema Tirso-Flumendosa-Campidano: Sulcis, Tirso, Sud Orientale y Flumendosa-Campidano-Cixerri (figura 2). Este sistema corresponde aproximadamente con 60% de la superficie de la isla.

Los aportes hidrológicos (cuadro 1) aplicados al sistema hidráulico se han obtenido a partir de las series temporales de precipitación de los periodos 1922-1975 y 1986-2002. Estas series tienen en cuenta los efectos de las sequías producidas por la disminución de las aportaciones. Las series de aportaciones al sistema

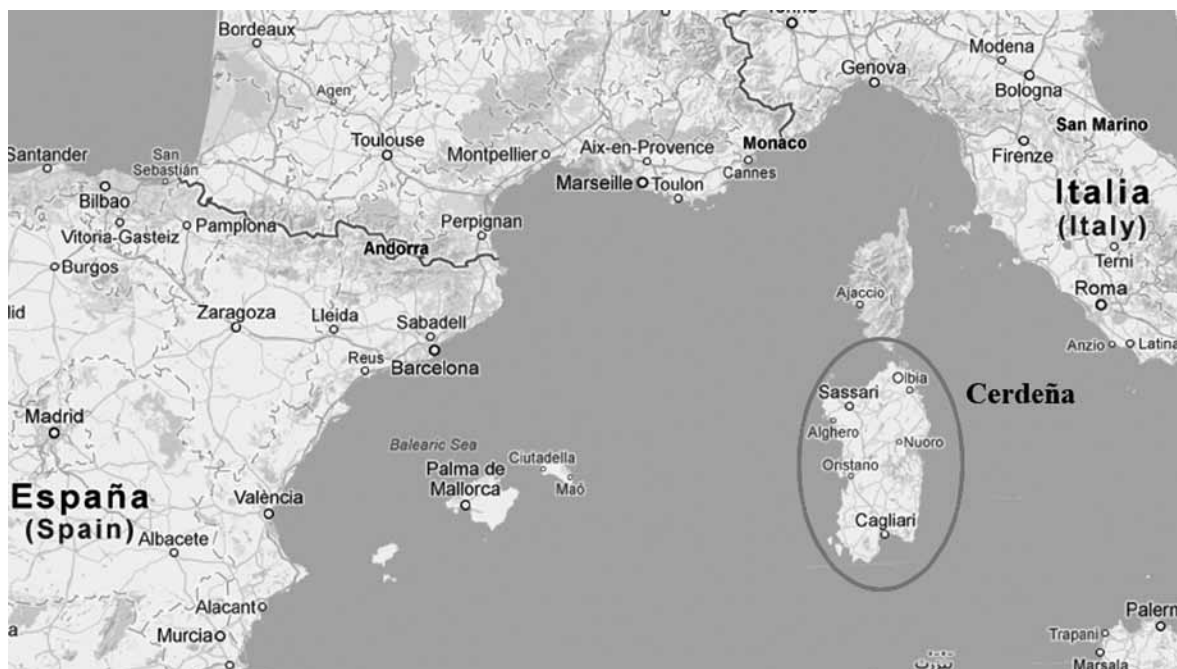


Figura 1. Ubicación geográfica de la isla de Cerdeña, Italia (fuente: Google Maps).

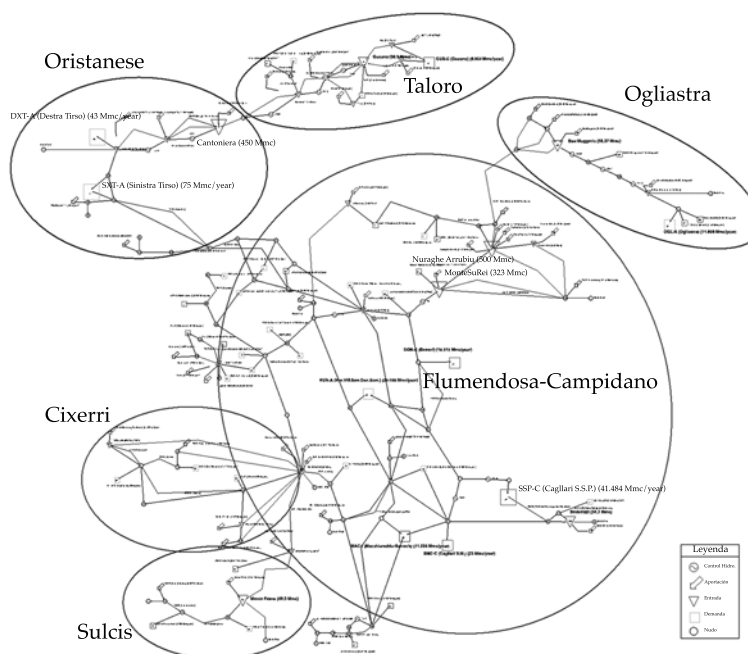


Figura 2. Esquema del modelo del sistema Tirso-Flumendosa-Campidano en AQUATOOL.

Cuadro 1. Valores medios de las aportaciones al sistema en las distintas zonas del sistema.

	Taloro	Tirso	Ogliastra	Flum-Camp	Cixerri	Sulcis
Aportación media (hm³/año)	83.5	289.63	59.78	356.22	14.56	39.55

constituyen en definitiva un periodo de 53 años y están asociadas con los embalses y azudes del sistema.

Metodología de optimización

La metodología planteada en este artículo se basa en la estimación de RG óptimas para un sistema multi-embalse complejo, combinando el uso de redes de flujo (modelo *SIMGES*) y algoritmos de optimización evolutivos (*SCE-UA* y *Scatter Search*). Los modelos de simulación permiten simular la gestión de un sistema de recursos hídricos y el reparto del agua entre los diferentes usuarios de la cuenca. En concreto, las redes de flujo se utilizan como modelos de gestión de cuencas, realizando simulaciones mediante la herramienta *SIMGES* y obteniendo del modelo cómo se realiza el reparto de agua.

Por su parte, los algoritmos de optimización se utilizan como herramientas que controlan las sucesivas simulaciones que se llevan a cabo con *SIMGES*, y que van modificando las variables de decisión (parámetros de la RG), en función de los resultados obtenidos en cada una de ellas. Es necesario, pues, para cada iteración, emplear el modelo *SIMGES* que evalúa la RG propuesta por el algoritmo de optimización en el modelo de simulación del caso de estudio. El objetivo es obtener los resultados de déficits, bombeos, etcétera, los cuales permitirán encontrar la solución óptima a la gestión.

La figura 3 muestra el procedimiento, paso a paso, que se sigue para la obtención de RG mediante una *aplicación principal* (AP) que se encarga de llamar al algoritmo de optimización y al modelo *SIMGES*. La AP lleva incorporado el código del algoritmo de optimización a emplear (*SCE-UA* o *Scatter Search*), junto con los parámetros del algoritmo, los resultados de la simulación y la función objetivo.

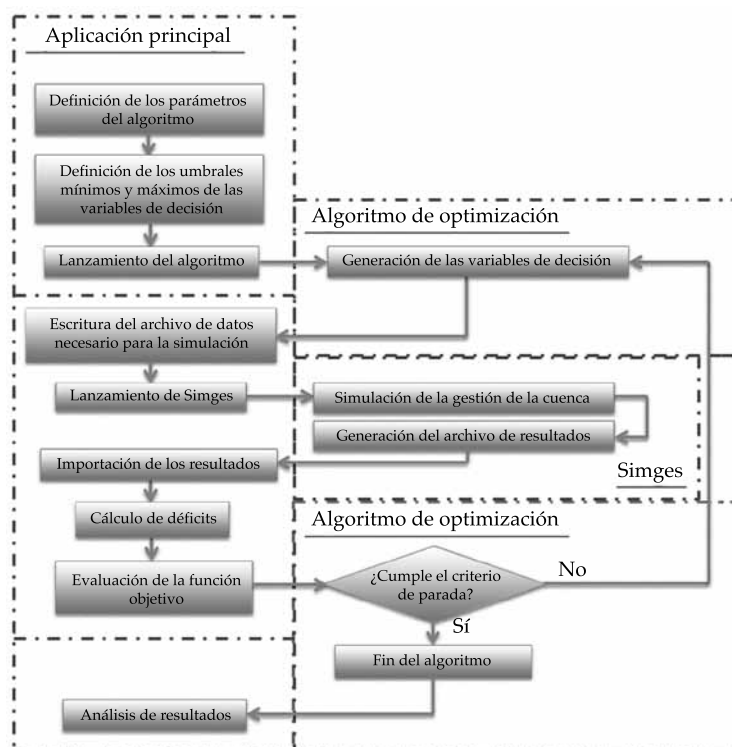
En primer lugar, el usuario debe asignar los parámetros con los que se quiere lanzar el algoritmo evolutivo (semillas, probabilidad de cruce, tipo de mutación, número de complejos, etcétera). A continuación se definen las variables que el algoritmo ha de ir modificando (variables de decisión, parámetros de la RG), así como sus límites inferiores y superiores.

Una vez definidas, la AP ejecuta el algoritmo de optimización, el cual va generando esas variables de decisión. Para cada generación (o iteración) se escribe el archivo de datos necesario para la simulación. Automáticamente, la AP lanza *SIMGES*, que simula la gestión propuesta para el periodo de tiempo que se le ha indicado al realizar el modelo de simulación y una vez se ha ejecutado guarda los resultados en un archivo. Este último archivo es importado por la AP, lo que permite obtener los déficits y caudales bombeados, entre otras cosas, y así poder calcular la función objetivo. Una vez evaluada la función objetivo, si no se cumple el criterio de parada del algoritmo, se repite el mismo proceso a partir de la generación de las variables de decisión, buscando la optimización de la gestión, de lo cual se encarga el algoritmo empleado.

Finalizado el proceso realizado por la AP, es el turno del usuario para analizar los resultados y tomar decisiones.

El módulo de simulación de la gestión *SIMGES*

El módulo *SIMGES* (Andreu, Solera, Capilla, & Ferrer, 1992) es un modelo general para la simulación de la gestión de cuencas, o sistemas de recursos hidráulicos complejos. Este módulo forma parte del *SSD AQUATOOL* (Andreu, Solera, & Paredes, 1996). Tanto el módulo de simulación como el *SSD* han sido extensamente

Figura 3. Metodología de acoplamiento entre el algoritmo evolutivo y *SIMGES*.

aplicados en cuencas españolas y del extranjero (CHJ, 1998; MIMAM, 2000; DICTUC, 2010; RAS, 2013; Jamieson, 1997). *SIMGES* dispone de elementos de regulación o almacenamiento tanto superficiales como subterráneos de captación, transporte, utilización y/o consumo, y dispositivos de recarga artificial. La simulación se efectúa por mes y reproduce el detalle espacial que el usuario desee del flujo del agua a través del sistema. Para los subsistemas superficiales, el flujo es calculado simplemente por continuidad o balance. Los acuíferos y las relaciones río-acuífero se simulan con modelos unicelulares, con modelos pluricelulares o utilizando el método de los autovalores mediante modelos distribuidos en los que se considera la variación espacial de las propiedades hidrodinámicas de los acuíferos. También se admite la definición de caudales mínimos ecológicos, así como de diferentes prioridades de los usuarios para el aprovechamiento del agua.

SIMGES emplea pseudocostes diseñados para reflejar prioridades, imposibilidades físicas, preferencias, etcétera. Este problema se representa matemáticamente de la siguiente manera:

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

sujeto a:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^m x_{ij} - \sum_{k=1}^m x_{ki} &= 0 \quad \forall i = 1, \dots, m \\ x_{ij} &\geq l_{ij} \quad \forall i = 1, \dots, m \quad \forall j = 1, \dots, m \\ x_{ij} &\leq u_{ij} \quad \forall i = 1, \dots, m \quad \forall j = 1, \dots, m \end{aligned} \quad (2)$$

donde x_{ij} es el caudal circulante a través del arco desde el nudo i hasta el nudo j ; c_{ij} , el coste por cada unidad de caudal circulante, y l_{ij} y u_{ij} son

los límites inferiores y superiores del caudal, respectivamente, del arco que empieza en el nudo i y acaba en el nudo j . En realidad, el modelo permite flujos más bajos que el límite mínimo, pero no permite flujos mayores al límite máximo. Bajo estos supuestos, el problema de optimización se puede resolver de manera eficiente utilizando el algoritmo Out-of-Kilter (Ford & Fulkerson, 1962).

El algoritmo SCE-UA

El mecanismo de optimización SCE-UA (The Shuffled Complex Evolution) fue desarrollado por Duan, Sorooshian y Gupta (1992) en la Universidad de Arizona, Estados Unidos, y su eficiencia ha sido ampliamente reconocida ante problemas de calibración de modelos hidrológicos con un elevado número de parámetros y una alta no linealidad. El funcionamiento básico del algoritmo SCE está inspirado en los principios de selección natural y la genética y es una combinación de procedimientos deterministas y aleatorios. Se parte de diferentes puntos de búsqueda (individuos) que se organizan por equipos (complex). De esta manera, la búsqueda de la solución global óptima se plantea como un proceso evolutivo (*evolution*) basado en la reproducción (cruce, mutación, recombinación), existiendo, además, mezcla de equipos (*shuffled*).

El algoritmo Scatter Search

Scatter Search (Glover, 1977), también conocido en castellano como “búsqueda dispersa”, es un procedimiento metaheurístico basado en formulaciones y estrategias introducidas en la década de 1960. Los conceptos y principios fundamentales del método están basados en las estrategias para combinar reglas de decisión. *Scatter Search* opera sobre un conjunto de soluciones, llamado conjunto de referencia, combinando éstas para crear nuevas soluciones de modo que mejoren a las que las originaron. En este sentido se dice que es un método evolutivo. Sin embargo, a diferencia de otros métodos evolutivos, como los algoritmos genéticos, *Scatter Search* no está

fundamentado en la aleatorización sobre un conjunto relativamente grande de soluciones sino en elecciones sistemáticas y estratégicas sobre un conjunto pequeño. Por lo general, los algoritmos genéticos suelen considerar una población de 100 soluciones mientras que en la búsqueda dispersa es habitual trabajar con un conjunto equivalente de tan sólo 10 soluciones.

Aplicación al sistema de estudio

La comparativa entre los algoritmos y, por tanto, la aplicación de la metodología planteada, se llevará a cabo sobre el sistema Tirso-Flumendosa-Campidano. En este apartado se describe el modelo de gestión implementado en *AQUATOOL*, los resultados de la simulación de su gestión con *SIMGES* y la definición de la metodología para este caso de estudio.

Desarrollo del modelo de gestión

En este punto se detalla alguna de la información más relevante del sistema introducida en *AQUATOOL*. El sistema consta de 23 embalses, cuyas capacidades varían entre los 0.94 y 450 hm³. Los más importantes son los embalses de Cantoneira (450 hm³), Monte Su Rei (323 hm³) y Nuraghe Arrubiu (300 hm³). El primero de estos tres embalses se encuentra en el río Tirso, en la zona de Oristanese, y los otros dos en la zona Flumendosa-Campidano. Los tres embalses, gracias a sus capacidades y ubicación, permiten el suministro a la gran mayoría de demandas del sistema.

En cuanto a los azudes, el sistema presenta un total de 14 infraestructuras, con distintos caudales de extracción de agua. Estos caudales varían entre 0.2 y 36 m³/s. Los más importantes son los de la cabecera del río Flumendosa, en la zona de Ogliastra (Bau Mela y Bau Mandara), al este de los embalse de Monte Su Rei y Nuraghe Arrubiu (Ponte Maxia), y al oeste de éstos (Casa Fiume).

El número total centrales hidroeléctricas es de 14. Los caudales turbinados varían entre los 0.5 y 95 m³/s. La más importante es la que se encuentra aguas abajo del embalse de Gusana, en la zona de Taloro.

Los sistemas de bombeo son obras de infraestructuras a las cuales se les da gran importancia debido al coste económico que suponen. El sistema consta de 23 bombeos, cuyo caudal máximo está comprendido entre 0.07 y 6 m³/s. Sus costes unitarios varían entre 0.005 y 0.11 €/m³.

Respecto a los usuarios del sistema, éste tiene un total de 44 demandas, 15 urbanas, 6 industriales y 23 agrarias. Las demandas urbanas tienen dotaciones comprendidas entre 0.2 y 41.4 hm³/año. La demanda más importante es la de la ciudad de Cagliari. Las demandas industriales varían entre 0.04 y 11.6 hm³/año, y las agrarias entre 0.1 y 75 hm³/año. Como se puede observar, los valores de las dotaciones son muy dispares. Respecto a las demandas agrarias, las dos demandas más importantes son las de Oristanese con 43 y 75 hm³/año, aguas abajo del embalse de Cantoneira. Con todo ello, la dotación total del sistema asciende a 383.25 hm³/año.

La gestión del sistema se introduce mediante prioridades entre las demandas, entre los embalses, costes en los bombeos, reglas de operación, etcétera. Por ejemplo, a las demandas con más prioridad con las urbanas, seguidas de las industriales y por último las agrarias. Respecto a la gestión mediante la aplicación de reglas de operación, éstas se definen como un umbral constante para los doce meses del año. Normalmente se describe como: "Si el volumen almacenado en el embalse (o aportación) X es inferior al nivel (o caudal) Y, entonces se aplica una restricción de Z al caudal circulante (en el elemento donde se aplica la RG)". Las RG definidas permiten reservar el agua de un em-

balse para las demandas de una zona concreta o minimizar el caudal bombeado, reduciendo así el coste económico originado por este elemento.

Resultados de la gestión del estado actual del sistema

Una vez introducidas las distintas RG en el modelo, se simula la gestión del sistema mediante el módulo de cálculo *SIMGES* (ver apartado 3.3), obteniendo una serie de resultados. El tipo de resultados que se puede obtener es extenso, desde volúmenes almacenados en los embalses, caudales circulantes por cada conducción hasta los déficits de las demandas. Aquí se van a comentar sólo resultados de déficits en las demandas y el coste medio anual de bombeo del sistema, ya que la optimización del sistema se centrará en estos dos aspectos, como se detalla en el apartado "Definición de la metodología para el caso de estudio".

El número total de demandas que sufren déficit en el sistema son cuatro (cuadro 2), de las cuales una de ellas es una demanda urbana. El motivo de que esta demanda sufra déficits es su ubicación (en la cabecera del sistema, zona de Taloro) y la falta de aportaciones en dicha zona. Estas circunstancias provocan que la demanda tenga dos periodos de varios meses en los que no se suministra 100% de su dotación. El resto de demandas con déficits son de tipo agrario: dos en la zona de Cixerri y una en la de Leni.

Respecto al coste medio anual de bombeo, éste se sitúa en los 3 675 330.24 €, calculado según el caudal bombeado por cada sistema de bombeo y el coste unitario de cada uno de ellos.

Cuadro 2. Máximo déficit anual de las demandas con déficit para el estado actual.

Demandas	Máximo déficit anual (%)
GIO-A	86
GUS-C	47.04
LEN-A	80.2
IGL-A	2.9

Definición de la metodología para el caso de estudio

La metodología planteada se aplica al sistema Tirso-Flumendosa-Campidano. Para ello hay que definir una serie de aspectos que se han comentado antes, como los parámetros de los algoritmos, las RG que se pretenden optimizar y la función objetivo a emplear para dicha optimización.

El algoritmo *SCE-UA* requiere definir una serie de parámetros, como el número máximo de evaluaciones de la función objetivo que va a minimizar, la forma en que finalizará en el caso de que no superase ese número máximo de evaluaciones. También se define la semilla inicial, a partir de la cual se generarán de forma aleatoria las variables de decisión y el número de complejos en el que se dividen los distintos individuos que genera el algoritmo. El valor de estos parámetros se ha especificado con base en diversos estudios llevados a cabo en el Grupo de Investigación de Recursos Hídricos de la Universitat Politècnica de València con el algoritmo *SCE-UA* para la calibración de distintos tipos de parámetros. El resultado de tales análisis permite considerar los parámetros empleados como adecuados para la optimización.

A diferencia del *SCE-UA*, el *Scatter Search* sólo requiere definir el tamaño de la población y del grupo de referencia con el que trabajará, aparte del número de iteraciones. Como se explica en el apartado “El algoritmo *Scatter Search*”, este algoritmo suele trabajar con poblaciones pequeñas, por lo general de 10 individuos. Así, los análisis realizados se han empleado en esta cantidad para el tamaño de la población. Respecto al grupo de referencia, se ha optado por emplear la mitad del tamaño de la población, es decir, cinco individuos.

Respecto a la RG a optimar, ésta se centra en dos aspectos. Por un lado, los volúmenes objetivo (V_{obj}) de los embalses y, por otro lado, reglas de operación (RO). En *SIMGES* se considera el V_{obj} como un valor que permite zonificar el embalse y con ello asignar un coste por extraer agua de esa zona del embalse. Por otra parte, la gestión de los recursos hidráulicos se simula

mediante RO tendientes a mantener un nivel similar de llenado en los embalses a partir de unas curvas de zonado de embalse. Dichas curvas son las reglas de explotación propiamente dichas y son suministradas por el usuario del modelo.

Respecto al primer aspecto, se modificarán los V_{obj} de los dos embalses principales del sistema Flumendosa-Campidano (Monte Su Rei y Nuraghe Arrubiu), y los de los embalses de Punta Gennarta y Medau Zirimilis (en la zona de Cixerri). El resto de la gestión que se va a modificar es la RO definida en la toma este de la demanda de Sarcidano (para minimizar el bombeo 7A.P1) y la RO definida en el bombeo de Sulcis (desde Genna Is Abbis a Bau Pressiu).

El objetivo de la optimización, para el caso de estudio, es obtener el menor número de demandas con déficit, junto con el valor más bajo posible del máximo déficit anual de éstas. Por un lado, se pretende que el menor número de usuarios se vea afectado, pero por otro lado, es menos perjudicial que cuando se produzcan déficits en el suministro lo hagan de forma repartida a lo largo de un periodo de años que una falta de suministro muy alta en un único año. Además, el sistema Tirso-Flumendosa-Campidano tiene un complejo entramado de infraestructuras, formado por conducciones y sistemas de bombeo. Estos últimos tienen gran interés en la gestión debido al importante coste económico que suponen. Es por este motivo que también se buscó el menor caudal bombeado, con el fin de disminuir los gastos económicos generados por éstos. El problema que supone estos dos objetivos es que normalmente, en este tipo de sistema, disminuir los déficits de las demandas supone un aumento en los caudales bombeados y, por tanto, en su coste final. Por tales motivos, con la función objetivo que se define, se pretende que ambos conceptos se minimicen para obtener la gestión óptima:

$$FO = 0.5 * \sum CSB * C_{CSB} + 0.3 * CDD * C_{ND} + 0.2 * \frac{\sum MDA}{CDD} * C_{MDA}$$

Siendo CDD el número de demandas con déficit, C_{ND} es un coeficiente que permite que el término $CDD \cdot C_{ND}$ esté entre 0 y 1, siendo 1 el peor resultado. También tiene en cuenta el tipo de demandas con déficit. En el caso de que alguna demanda urbana sufra déficits, el término $CDD \cdot C_{ND}$ tiene un valor de mil. De esta forma se infiere que la solución obtenida no es buena.

MDA es el déficit máximo anual de cada demanda del sistema, C_{MDA} es un coeficiente similar a C_{ND} . En este caso, tiene en cuenta los criterios de garantía UTAH (IPH, 2008), empleados en España para verificar el cumplimiento de las demandas agrarias. El criterio UTAH está basado en el establecimiento de límites para los máximos déficit que se pueden producir en periodos de tiempo de determinada duración. En concreto, los lapsos son 1, 2 y 10 años, y los umbrales de cumplimiento para estos periodos son 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 a 50% de la demanda anual; el máximo déficit de dos años consecutivos sea inferior a 75% de la demanda anual, y el máximo déficit de 10 años consecutivos sea inferior a 100% de la demanda anual.

En el primer término se tienen en cuenta los costos económicos de los sistemas de bombeo (CSB). El término C_{CSB} es otro coeficiente para hacer el término $CSB \cdot C_{CSB}$ unitario, y sólo en el caso de que el coste de bombeo supere un cierto valor (considerado como límite superior), dicho término adopta un valor de mil, considerando inviable dicha solución.

Discusión y análisis de resultados

En este apartado se presentan los resultados obtenidos con la metodología planteada para los dos algoritmos comparados: el *SCE-UA* y el *Scatter Search*. Se mostrará un gráfico con todas las RG analizadas por cada algoritmo, representándose en dicho gráfico el número de demandas con déficit (abscisas) y el coste medio anual de bombeo (ordenadas). De todas las soluciones

se han elegido aquellas que se han considerado más óptimas, es decir, aquellas que proporcionan el menor número de demandas con déficit y el menor costo económico de bombeo. Aun así, el usuario que emplee esta metodología para la optimización de RG en sistemas multiembalse puede seleccionar aquella alternativa que crea más conveniente, según los intereses del sistema. Es decir, podría elegir alguna alternativa en la que exista un mayor número de demandas con déficits, pero se reduzca el caudal bombeado y, por tanto, el costo económico asociado con dichos bombeos.

SCE-UA

La optimización llevada a cabo con el algoritmo *SCE-UA* ha empleado un total de 1 594 iteraciones hasta su finalización. La mejor función objetivo conseguida tiene un valor de 0.570 (siendo 0 el mejor resultado que se podría obtener y 1 el peor), con un costo medio anual de bombeo de 3 161 191.56 € y un número total de demandas con déficit de tres. El valor de la función objetivo para los resultados mostrados en el apartado "Resultados de la gestión del estado actual del sistema", que representa el estado actual del sistema, es de 0.626. Como se ve en la figura 4, en la que aparecen los resultados de todas las iteraciones, es la solución con menor número de demandas con déficit y menor coste medio anual de bombeo.

El cuadro 3 muestra el valor del máximo déficit anual para las tres demandas con déficit que ha encontrado el algoritmo. Comparando estos resultados con los obtenidos en el apartado "Resultados de la gestión del estado actual del sistema", se aprecia una mejoría tanto en el número de demandas con déficit como en el coste de bombeo. Se ha conseguido que la demanda IGL-A no sufra déficits, reduciendo las demandas con déficit de cuatro a tres. Además, el máximo déficit anual de la demanda GIO-A ha disminuido ligeramente. Con ello, se observa cómo se ha mejorado la gestión en la zona de Cixerri a la cual pertenecen las demandas IGL-A y GIO-A.

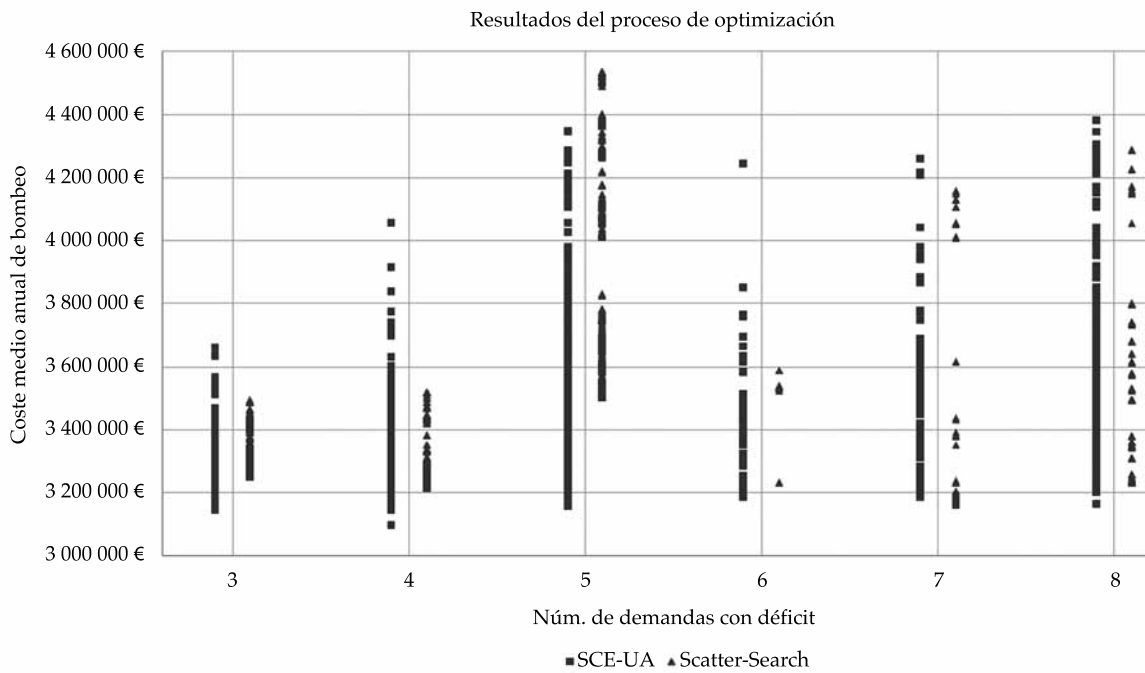


Figura 4. Resultados de la optimización con los algoritmos SCE-UA y Scatter-Search.

Cuadro 3. Máximo déficit anual de las demandas con déficit obtenido con el SCE-UA.

Demandas	Máximo déficit anual (%)
GIO-A	85.15
GUS-C	47.04
LEN-A	80.19

Al mismo tiempo, se consigue una reducción importante en el coste medio anual de bombeo, pasando de 3 675 330.24 € a los 3 161 191.56 € de esta alternativa, una disminución de aproximadamente medio millón de euros.

Para obtener el resultado mencionado, el algoritmo ha definido los valores de la RG que se muestran en el cuadro 4. Para los volúmenes de Monte Su Rei y Nuraghe Arrubiu son valores pequeños respecto de sus máximos (323 y 300 hm³, respectivamente). En Is Barroccus, el volumen obtenido es mayor al que estaba definido (5 hm³), pero sin alcanzar el máximo (12.25 hm³). En el caso de Sulcis, se obtiene un valor inferior al actual (2 hm³) y lejos de su valor máximo (8.25 hm³). Para acabar, en los embalses de Punta Gennarta y Medua Zirimilis (en Cixerri) se ha

conseguido disminuir los volúmenes respecto de sus valores máximos (12.7 y 16.7 hm³, respectivamente).

Scatter Search

Empleando el algoritmo *Scatter Search* se han realizado 3 999 evaluaciones de la función objetivo y la solución óptima obtenida es aquella que presenta tres demandas con déficit y un coste medio anual de bombeo de 3 251 280.22 €. El valor de la función objetivo alcanzada es 0.579.

En este caso, en el cuadro 5 se presentan los resultados para dos alternativas de gestión: la obtenida como solución óptima por el algoritmo (tres demandas con déficit) y otra con un menor

Cuadro 4. Volúmenes (hm³) que definen la RG obtenida por el algoritmo SCE-UA.

Monte Su Rei	Nuraghe Arrubiu	Is Barrocos	Sulcis	Punta Gennarta	Medau Zirimilis
36.043	10.064	8.455	1.089	7.787	13.134

Cuadro 5. Resumen de resultados para las dos alternativas analizadas (déficits (%) y coste de bombeo) con el Scatter Search.

Núm. de demandas déficit	3	4
Coste de bombeo	3 251 280.22 €	3 205 080.61 €
GUS-C	47.04	47.04
LEN-A	80.19	80.19
GIO-A	85.15	85.15
IGL-A	0	3.25

coste medio anual de bombeo, pero con cuatro demandas que sufren déficits. Como se puede apreciar en dicho cuadro, los déficits son prácticamente iguales en ambas alternativas, sólo que para que la demanda IGL-A no sufra déficits, es necesario un ligero incremento del coste medio anual de bombeo.

El cuadro 6 muestra las RG para las dos alternativas analizadas en el cuadro anterior. Los valores de los volúmenes de las RG son bastante similares en ambas alternativas, la única diferencia importante es el nivel en Nuraghe Arrubiu, en donde se define un valor de casi 42 hm³ para conseguir tres demandas con déficit, en vez de cuatro.

Comparativa de algoritmos

En este punto se quieren mostrar las similitudes y diferencias entre los dos algoritmos evolutivos analizados: el SCE-UA y el Scatter Search. En primer lugar, se puede apreciar cómo el número de iteraciones del SCE-UA es inferior al del Scatter Search, con lo que, sin considerar otro aspecto, se podría decir que el primero es más eficiente.

Atendiendo a la función objetivo y, por tanto, a los resultados obtenidos, las opciones elegidas por los algoritmos son más óptimas, en términos de déficits y costes de bombeo, que la gestión actual del sistema. Ambos algoritmos consiguen reducir el número de demandas que sufren déficit de cuatro a tres. Las demandas que presentan los mismos déficits (GUS-C, LEN-A y GIO-A) muestran iguales valores de los máximos déficits anuales. Sin embargo, el SCE-UA obtiene un coste medio anual de bombeo inferior al de la alternativa del Scatter Search; es decir, el SCE-UA obtiene mejores resultados.

En la figura 4 se aprecia que las soluciones encontradas por el Scatter Search se concentran en determinados valores de los costes medios anuales de bombeo a diferencia de la distribución más o menos homogénea que se obtiene con el SCE-UA; esto es, hay rangos del coste medio anual de bombeo que el Scatter Search no analiza o no obtiene soluciones.

Comparando los valores de las RG del Scatter Search (cuadro 6) con los del SCE-UA (cuadro 4), los primeros son algo superiores, salvo para los volúmenes de Monte Su Rei y Nuraghe

Cuadro 6. Volúmenes (hm³) que definen las RG de las alternativas analizadas.

Demandas con déficit	Monte Su Rei	Nuraghe Arrubiu	Is Barrocos	Sulcis	Punta Gennarta	Medau Zirimilis
3	35.73	41.789	8.011	5.619	12.226	15.99
4	51.391	0	8.873	4.732	12.7	16.7

Arrubiu. Con esto se puede apreciar cómo para volúmenes menores en Is Barrocos, Sulcis, Punta Gennarta y Medau Zirimilis, y por tanto menos restrictivos, se pueden alcanzar resultados iguales o más óptimos de la gestión si se definen correctamente los V_{obj} de Monte Su Rei y Nuraghe Arrubiu. Estos resultados también indican cómo distintas combinaciones de los parámetros que definen la RG pueden alcanzar resultados igual de óptimos.

Conclusiones

El artículo muestra la comparativa de dos algoritmos evolutivos para la optimización de reglas de gestión en sistemas multiembalse, acoplándolos con una red de flujo. Esta metodología permite obtener un conjunto de alternativas de gestión, entre ellas, algunas más óptimas que las que actualmente se emplean en el sistema, en términos de déficits en las demandas y en costes de bombeo. Los algoritmos de optimización comparados han sido el *SCE-UA* y el *Scatter Search*. La simulación de la gestión se ha llevado a cabo con el programa *SIMGES*, basado en una red de flujo, que forma parte de Sistema Soporte a la Decisión *AQUATOOL*.

Dicha metodología se ha aplicado sobre el sistema de recursos hídricos Tirso-Flumendosa-Campidano en Cerdeña, Italia. Los resultados obtenidos muestran una gestión más óptima del sistema con menor número de demandas con déficit y menor coste económico del bombeo. Este hecho se observa en los resultados de ambos algoritmos; empero, el *SCE-UA* parece ser más eficiente (menos iteraciones), además de llegar a una solución más óptima que la del *Scatter Search*.

Por último, esta metodología ayuda a los usuarios y a los gestores del sistema a decidir la mejor o más conveniente gestión de dicho sistema.

Agradecimientos

Los autores desean dar las gracias a la Universidad de Cagliari (Cerdeña) y a la Agencia de Cuenca de Cerdeña (Ente

Acque Della Sardegna-ENAS) por los datos proporcionados en el desarrollo de este estudio. Al Ministerio de Ciencia e Innovación de España (Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología, CICYT) por la financiación de los proyectos NUTEGES (VI Plan Nacional de I+D+i 2008-2011, CGL2012-34978). Los autores también quieren dar las gracias a la Comisión Europea (Directorate-General for Research & Innovation) por la financiación del proyecto DROUGHT-R&SPI (programa FP7-ENV-2011, proyecto 282769) y al proyecto ENHANCE (FP7-ENV-2012, proyecto 308438).

Referencias

- Ahmed, J. A., & Sarma, A. K. (2005). Genetic Algorithm for Optimal Operating Policy of a Multipurpose Reservoir. *Water Resources Management*, 19, 145-161.
- Akter, T., & Simonovic, S. P. (2004). Modelling Uncertainties in Short-Term Reservoir Operation Using Fuzzy Sets and a Genetic Algorithm. *Hydrological Science Journal*, 49(6), 1079-1081.
- Andreu, J., Solera, A., Capilla, J., & Ferrer, J. (1992). Modelo SIMGES de simulación de la gestión de recursos hídricos, incluyendo utilización conjunta. Manual de usuario. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Andreu, J., Solera, A., & Paredes, J. (1996). AQUATOOL SSD para planificación de cuencas. Manual de usuario v.1.0. DIHMA. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Bhaskar, N. R., & Whitlatch Jr., E. E. (1980). Deriving of Monthly Reservoir Release Policies. *Water Resources Research*, 16(6), 987-993.
- Bower, B. T., Hufschmidt, M. M., & Reedy, W. H. (1962). *Operation Procedures: Their Role in the Design and Implementation of Water Resource Systems by Simulation Analysis* (pp. 443-458). Chap. 11. In A. Maass et al (Eds.). *Design of Water Resource Systems*. Cambridge, USA: Harvard University Press.
- Cai, X., McKinney D. C., & Lasdon L. S. (2001). Solving Nonlinear Water Management Models Using a Combined Genetic Algorithm and Linear Programming Approach. *Advances in Water Resources*, 24, 667-676.
- CHJ (1998). *Plan Hidrológico del Júcar*. Júcar, España: Confederación Hidrográfica del Júcar, Ministerio de Medio Ambiente.
- Clark, E. J. (1956). Impounding Reservoirs. *J. Am. Water Works Assoc.*, 48(4), 349-354.
- DICTUC (2010). *Análisis integrado de gestión en cuenca del río Copiapó*. Informe Técnico (Technical Report). Santiago, Chile: División de Ingeniería Hidráulica y Ambiental DICTUC para la Dirección General de Aguas. Recuperado de <http://documentos.dga.cl/ADM5220v1.pdf>.
- Dougherty, D. E., & Marryott, R. A. (1991). Optimal Groundwater Management 1. Simulated Annealing. *Water Resources Research*, 27(10), 2493-2508.

- Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V. (1992). Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models. *Water Resources Research*, 28(4), 1015-1031.
- Elferchichi, A., Gharsallah, O., Nouiri, I., Lebsi, F., & Lamaddalena, N. (2009). The Genetic Algorithm Approach for Identifying the Optimal Operation of a Multi-Reservoirs on-Demand Irrigation System. *Biosystems Engineering*, 102(3), 334-344.
- Ford, C. R., & Fulkerson, D. R. (1962). *Flow in Networks*. Princeton, USA: Princeton University Press.
- Glover, F. (1977). Heuristics for Integer Programming using Surrogate Constraints. *Decision Sciences*, 8, 156-166.
- Goldberg, D. E., & Kuo, C. H. (1987). Genetic Algorithms in Pipeline Optimization. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 1(2), 128-141.
- Guo, Y., Walters, G. A., & Savic, D. A. (2008). Optimal Design of Storm Sewer Networks: Past, Present and Future. Proc., 11th Int. Conference on Urban Drainage, IWA Pub., London.
- IPH (2008). *Instrucción de planificación hidrológica*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente Rural y Marino. BOE 229 de 22/09/2008.
- Jamieson, D. G. (1997). Special Issue on Decision-Support Systems (DSS). *Journal of Hydrology*, 177(3-4). Comment. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169497825590>.
- Johnson, S. A., Stedinger, J. R., & Staschus, K. (1991). Heuristic Operating Policies for Reservoir System Simulation. *Water Resources Research*, 27(5), 673-685.
- Karamouz, M., Szidarowsky, F., & Zahraire, B. (2000). *Water Resources System Analysis*. Boca Raton, USA: Lewis Publishers, CRC Press.
- Kuczera, G. (1993). Network Linear Programming Codes for Water-Supply Headworks Modeling. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 119, 412-417.
- Labadie, J. W. (2004). Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-of-the-Art Review. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(2), 93-111.
- Loucks, D. P., & Sigvaldason, O. T. (1982). Multiple Reservoir Operation in North America (pp. 1-103). In Z. Kaczmarck & J. Kindler (Eds.). *The Operation of Multiple Reservoir Systems*. Luxemburgo, Austria: IIASA Collaborative Proceedings Series. International Institute for Applied Systems Analysis. CP-82-53.
- Lund, J., & Ferreira, I. (1996). Operating Rule Optimization for Missouri River Reservoir System. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 122(4), 287-295.
- MIMAM (2000). *Libro Blanco del Agua en España*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas.
- Moeini, R., Afshar, A., & Afshar, M. H. (2010). Fuzzy Rule-Based Model for Hydropower Reservoirs Operation. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 33(2), 171-178.
- Muleta, M. K., & Nicklow, J. W. (2005). Decision Support for Watershed Management Using Evolutionary Algorithms. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(1), 35-44.
- Murthy, Z. V. P., & Vengal, J. C. (2006). Optimization of a Reverse Osmosis System Using Genetic Algorithm. *Sep. Sci. Technol.*, 41(4), 647-663.
- Nicklow, J., Reed, P., Savic, D., Dessalegne, T., Harrell, L., Chan-Hilton, A., Karamouz, M., Minsker, B., Ostfeld, A., Singh, A., & Zechman, E. (2010). State of the Art for Genetic Algorithms and Beyond in Water Resources Planning and Management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(4), 412-432.
- Oliviera, R., & Loucks, D. P. (1997). Operating Rules for Multireservoir Systems. *Water Resources Research*, 33(4), 839-852.
- RAS (2013). Final Report of the RAS Project: Decision Support System Models Development for Multi-Use Water Resource Systems in Water Scarcity Conditions Using Mixed Simulation-Optimization Techniques. In press.
- Young, G. (1967). Finding Reservoir Operating Rules. *J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, 93(6), 297-321.

Dirección institucional de los autores

M.C. Néstor Lerma

Dr. Javier Paredes-Arquiola

Dr. Joaquín Andreu

Dr. Abel Solera

Universitat Politècnica de València

Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente

Camino de Vera s/n

46022 Valencia, España

Teléfono: +34 (96) 3879 612, extensiones 79892, 77614,

79612

nestorlerma@upv.es

jparedea@hma.upv.es

ximoand@upvnet.upv.es

asolera@upvnet.upv.es