

## **GESTIÓN Y PLANIFICACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS: UN ENFOQUE BASADO EN LA OPTIMIZACIÓN**

**MARÍA MOLINOS-SENANTE**

*Maria.molinos@uv.es*

*Universidad de Valencia/Departamento de Matemáticas para la Economía y la Empresa  
Avda.Tarongers S/N, 46022, Valencia*

**MANUEL MOCHOLÍ-ARCE**

*Manuel.mocholi@uv.es*

*Universidad de Valencia/Departamento de Matemáticas para la Economía y la Empresa  
Avda.Tarongers S/N, 46022, Valencia*

**FRANCESC HERNÁNDEZ-SANCHO**

*Francesc.hernandez@uv.es*

*Universidad de Valencia/Departamento de Economía Aplicada II  
Avda.Tarongers S/N, 46022, Valencia*

**RAMÓN SALA-GARRIDO**

*Ramon.sala@uv.es*

*Universidad de Valencia/Departamento de Matemáticas para la Economía y la Empresa  
Avda.Tarongers S/N, 46022, Valencia*

Recibido (02/05/2013)

Revisado (29/09/2013)

Aceptado (13/10/2013)

**RESUMEN:** La gestión inadecuada de los recursos hídricos ha provocado la denominada crisis mundial del agua. Los modelos de optimización constituyen una herramienta muy útil en el proceso de planificación y gestión integral de este valioso recurso. En este trabajo proponemos un modelo global de optimización cuyo objetivo es minimizar el coste de abastecimiento de agua a nivel de demarcación hidrográfica. A diferencia de otros trabajos, el modelo propuesto integra tanto las fuentes de agua convencionales como no convencionales además de los usuarios agrícolas, urbanos e industriales. Así mismo, la consideración de la matriz de eficiencia proporciona información sobre las pérdidas de agua entre los orígenes y destinos. Sobre el modelo básico se proponen adicionalmente una serie de extensiones a considerar dependiendo de los objetivos de planificación hidrológica. El modelo desarrollado se ha aplicado a la Demarcación Hidrográfica del Segura mostrando la importancia de los recursos no convencionales para satisfacer la demanda. En definitiva, el modelo propuesto representa un enfoque innovador para mejorar la asignación de recursos hídricos contribuyendo a hacer un uso más sostenible del agua.

**Palabras clave:** gestión integral de recursos hídricos, optimización, asignación de agua, minimización de costes.

**ABSTRACT:** Inadequate management of water resources has led to the so-called global water crisis. Optimization models are a useful tool in the planning and management of this valuable resource. We propose an optimisation global model aimed to minimize water supply costs at river basin level. Unlike other works, the proposed model integrates both conventional and non-conventional water sources as well as agricultural, urban and industrial users. Moreover, it has been considered an efficiency matrix which provides information on water losses between the origins and destinations. On the basic model, a set of further extensions have been proposed depending on water planning objectives. The developed model has been applied to the Segura River Basin showing the importance of non-conventional water resources to meet demand. In short, the proposed model represents an innovative approach to improve the allocation of water resources aiding to make more sustainable water use.

**Keywords:** integrated water resources management, optimisation, water allocation, cost minimisation.

## 1. Introducción

El agua es un recurso natural básico tanto para el desarrollo humano como para el medio ambiente. El mal uso y la gestión inadecuada de los recursos hídricos han provocado la denominada crisis mundial del agua. En España son conocidos los problemas de escasez hídrica en el ámbito mediterráneo asociados no sólo con la climatología propia de esa área sino también como consecuencia del rápido desarrollo industrial, las actividades agrícolas y el aumento de la población.

Ante tal perspectiva, se hace necesario mejorar la gestión de los recursos hídricos con un doble objetivo: i) satisfacer la demanda de agua de los distintos usuarios; y ii) hacer un uso sostenible del agua contribuyendo a alcanzar el buen estado ecológico de las masas de agua conforme a las exigencias de la Directiva Marco del Agua (DMA).

En este contexto, la Gestión Integral de los Recursos Hídricos (GIRH) adquiere una especial relevancia. El objetivo básico es equilibrar la oferta y la demanda. Tradicionalmente, desde el lado de la oferta únicamente se consideraban los recursos convencionales que incluyen las aguas superficiales y subterráneas. Sin embargo, en las áreas de escasez hídrica, la necesidad de incrementar la oferta ha llevado a usar cada vez más los llamados recursos no convencionales entre los que se incluye la reutilización del agua regenerada y el agua desalada. Además existe una tercera fuente de agua que es la procedente de otras cuencas hidrográficas a través de trasvases. En lo que respecta a la demanda, se diferencian tres grandes usuarios que son la agricultura, la industria y el uso urbano. Todo ello, sin olvidar los usos medioambientales esenciales para alcanzar los objetivos definidos en la DMA.

Con el objetivo de mejorar la gestión y planificación de los recursos hídricos, en los últimos años se han desarrollado diversos modelos de optimización (Liu et al., 2011; Hajkowick y Collins, 2007). En este contexto y debido a que la agricultura es el mayor consumidor de agua (75% en España) (MAAMA, 2013), la mayoría de los modelos de optimización se han centrado en la asignación óptima de los recursos hídricos en sistemas agrícolas (Lu et al., 2012; Reça et al., 2001; Rejani et al., 2009). Por otra parte y teniendo en cuenta la importancia que está adquiriendo el uso de recursos no convencionales, algunos modelos de optimización han incorporado estas fuentes de agua (Han et al., 2008; Kondili et al., 2010; Ray et al., 2010).

En este trabajo proponemos un modelo global de optimización para la asignación de agua cuyo objetivo es minimizar los costes de abastecimiento integrando todas las fuentes de agua (convencional y no-convencional) y todas las demandas. En este sentido, hasta la fecha, únicamente los modelos propuestos por Han et al. (2008) y Kondili et al. (2010) consideraban múltiples usuarios y fuentes de agua. No obstante, el modelo de Han et al. (2008) queda restringido al ámbito urbano cuando la DMA establece claramente que la gestión de los recursos hídricos debe realizarse a nivel de demarcación hidrográfica. Por otra parte, el modelo desarrollado por Kondili et al. (2010) ignora el coste de distribución del agua desde la fuente hasta la demanda al asumir que los usuarios toman directamente el agua desde un tanque de almacenamiento. Con el objetivo de superar estas limitaciones, el modelo propuesto toma como referencia para la optimización todas las ofertas y demandas de agua existentes en la demarcación hidrográfica objeto de estudio. Por otra parte, el modelo desarrollado no sólo tiene en cuenta el coste de distribución del agua sino que además integra la llamada matriz de eficiencia que informa sobre las pérdidas de agua que se producen en el transporte entre los orígenes y destinos del recurso.

Si bien el modelo propuesto se centra en aspectos cuantitativos en el sentido de que su objetivo es asignar el agua al menor coste posible, también integra aspectos cualitativos ya que la calidad del agua requerida para cada uso es diferente. Así, previamente a la resolución del modelo, se define el tipo de demanda que cada oferta puede satisfacer en base a los parámetros de calidad que cumple.

Se trata de un modelo de gran utilidad para mejorar la gestión de los recursos hídricos en cuencas hidrográficas deficitarias contribuyendo a incrementar la sostenibilidad en el uso de este recurso escaso. En este sentido, el modelo propuesto garantiza la solución óptima global ya que se trata de una adaptación del *modelo general del transporte*.

## 2. Metodología

### 2.1 Descripción del modelo básico

En primer lugar, definiremos los elementos que el modelo integra tanto desde el lado de la oferta como de la demanda.

Por parte de la oferta, se han considerado las siguientes fuentes de agua: i) *recursos convencionales*: agua superficial (S) y agua subterránea (B); ii) *recursos no convencionales*: agua residual regenerada (R) y agua desalada (D) y; iii) *recursos externos*: agua procedente de trasvases de otras cuencas (T). Desde la perspectiva de la demanda, el modelo integra los siguientes usuarios: i) *demanda urbana* (U); ii) *demanda industrial* (I) y; iii) *demanda agrícola* (A).

Respecto a los aspectos cualitativos, es el agua regenerada la opción más controvertida en el sentido que el Real Decreto 1620/2007 define tanto los usos admitidos como prohibidos para las aguas regeneradas. Así, tal y como se muestra en la Figura 1, la reutilización se prohíbe para el consumo humano. Además, el propio Real Decreto 1620/2007 establece los criterios de calidad que las aguas regeneradas deben cumplir según su uso. Por otra parte, si bien el agua superficial, subterránea, desalada y procedente de trasvases puede utilizarse para abastecer las tres demandas (urbana, agrícola e industrial), la variabilidad en su calidad hace necesario evaluar en cada caso concreto que fuente de agua puede abastecer a cada usuario. El modelo que describimos no presenta estrictamente este tipo de condiciones, pero para su inclusión sólo es necesario modificar la matriz de conexiones origen-destino.

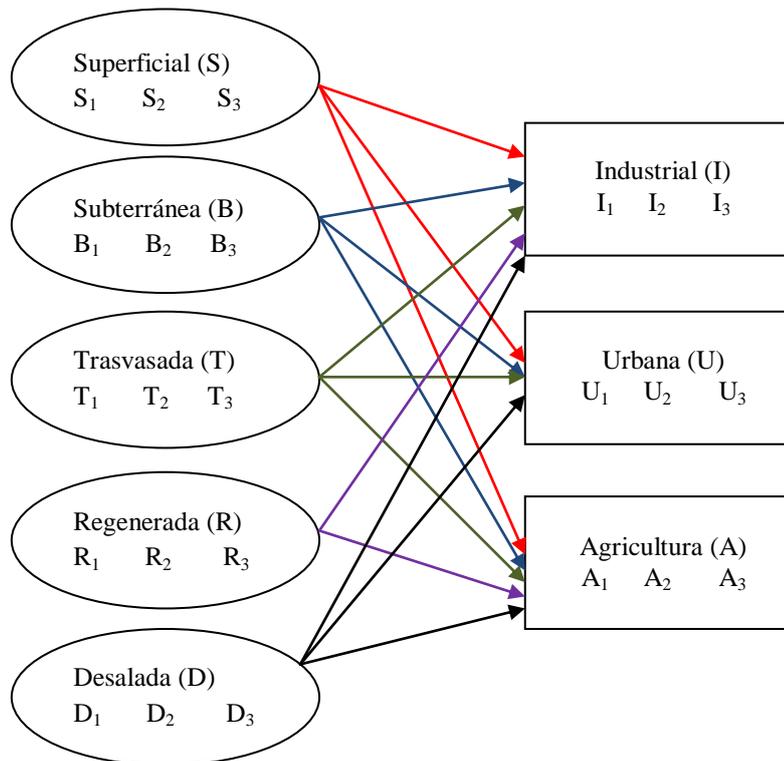


Figura. 1. Esquema general de asignación de agua

Una vez definidas tanto las fuentes como las demandas que integran el modelo, describimos sus restricciones.

#### 1) Disponibilidad de agua.

Las restricciones de oferta (Ec. 1) implican que la suma de los envíos desde cada origen a los distintos destinos no puede superar la disponibilidad de recursos de dicho origen. Nótese que la ecuación 1 incluye la variable  $MC_{jt}$  que es la denominada matriz de conexión entre orígenes y destinos. Dicha matriz

binaria toma el valor cero si no hay conexión entre el origen  $j$  y el destino  $k$  mientras que toma el valor 1 si el origen  $j$  y el destino  $k$  están conectados.

$$\sum_k X_{jkt} MC_{jkt} \leq DISP_{jt} \quad \forall j, t \quad (1)$$

donde  $X_{jkt}$  es el agua enviada ( $m^3$ ) desde el origen  $j$  al destino  $k$  en el periodo  $t$  y  $DISP_{jt}$  es la disponibilidad de agua ( $m^3$ ) en el origen  $j$  en el periodo  $t$ .

Una segunda restricción en este ámbito (Ec. 2) hace referencia a que la cantidad de agua que llega a cada destino  $k$  debe ser igual a la suma del agua enviada desde los distintos orígenes  $j$  teniendo en cuenta la eficiencia en la distribución del agua. Para ello, se define la matriz de eficiencia  $ME_{jkt}$  que representa el porcentaje de agua enviada desde el origen  $j$  que llega al destino  $k$  teniendo en cuenta las pérdidas de agua asociadas a fugas en las redes de distribución, filtraciones, evaporación, etc.

$$\sum_j X_{jkt} ME_{jkt} = Dem_{kt} \quad \forall k, t \quad (2)$$

donde  $Dem_{kt}$  es la demanda de agua ( $m^3$ ) del usuario  $k$  en el periodo  $t$ .

## 2) Restricción legal

El Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano establece en su artículo 7 que “la dotación de agua deberá ser suficiente para las necesidades higiénico-sanitarias de la población y el desarrollo de la actividad de la zona de abastecimiento, como objetivo mínimo debería tener 100 litros por habitante y día”. Por ello, la demanda mínima urbana debe satisfacer esta condición, es decir, sería el producto del volumen mínimo per cápita diario por el número de habitantes de la población.

$$Dem_{ut} \leq Dmin_{ut} \quad \forall u, t \quad (3)$$

Donde  $Dmin_{ut}$  es la demanda mínima de agua ( $m^3$ ) que debe ser satisfecha del destino urbano  $u \in k$  en el periodo  $t$ .

Finalmente, procedemos a definir la función objetivo (Ec. 4) que es abastecer toda la demanda al mínimo coste. Obviamente, una condición de factibilidad del modelo es que la oferta sea mayor o igual que la demanda (teniendo en cuenta la eficiencia en la distribución). En el caso de que no se cumpla esta condición, será necesario introducir variables de desviación que permitan identificar en qué destinos habría que imponer restricciones al consumo.

$$Min \quad Coste = \sum_t \sum_j \sum_k C_{jkt} X_{jkt} \quad (4)$$

donde  $C_{jkt}$  es el coste del suministro de agua ( $\text{€/m}^3$ ) desde el origen  $j$  al destino  $k$  en el periodo  $t$  ( $m^3$ ). El coste de abastecimiento incluye tanto la amortización como los costes fijos y variables de las infraestructuras de abastecimiento como son los canales, acequias, las plantas de regeneración de agua residual o las plantas desaladoras.

$$j = \{r_1, \dots, r_{nr}\} \cup \{s_1, \dots, s_{ns}\} \cup \{b_1, \dots, b_{nb}\} \cup \{t_1, \dots, t_{nr}\} \cup \{d_1, \dots, d_{nd}\}$$

$$k = \{a_1, \dots, a_{ma}\} \cup \{i_1, \dots, i_{mi}\} \cup \{u_1, \dots, u_{mu}\}$$

## 2.2 Extensiones del modelo

Sobre la base del modelo básico expuesto se pueden incluir ampliaciones y modificaciones de algunas de las hipótesis planteadas. Las posibilidades son variadas y deben ajustarse a los objetivos y necesidades de planificación de la cuenca hidrográfica objeto de estudio.

### 2.2.1. Posibilidad de construir nuevas desaladoras o realizar nuevos trasvases

La posibilidad de incorporar al modelo nuevas instalaciones de desalación o trasvases se realiza mediante la inclusión de variables binarias que representan la construcción o no de cada una de las opciones, es decir, se incluye el coste de la nueva construcción en la función objetivo asociada con la variable binaria correspondiente. De esta manera, se pasa del problema original de *transporte* a un problema de *coste fijo*. Así, habría que resolver un problema de programación entera frente al programa lineal planteado originalmente.

Por ejemplo, si se plantea la construcción de una nueva desaladora, la función objetivo del modelo se definirá como (Ec. 5)

$$\text{Min Coste} = \sum_t \sum_j \sum_k C_{jkt} X_{jkt} + Y_{nd} \sum_t \sum_k C_{kt} X_{kt} \quad (5)$$

donde  $Y_{nd}$  es una variable binaria que toma el valor uno si se decide abordar la construcción de la nueva desaladora y cero en caso contrario. Al igual que en la función objetivo inicial,  $C_{kt}$  es el coste de abastecimiento (procedente de la desalación en este caso) que incluye tanto la amortización como los costes fijos y variables de la nueva instalación.

### 2.2.2. Curvas de demanda y ajuste por tramos

Es bien sabido que las infraestructuras de abastecimiento de agua presentan importantes economías de escala y que el coste de suministro del agua es variable con el tiempo. Por ello, se propone incorporar al modelo general, curvas de demanda y de precios en lugar de considerar precios constantes para las diferentes fuentes. Las curvas de demanda se pueden integrar a través de funciones cuasi-lineales a modelizar mediante el uso de variables binarias. Esta opción garantiza la globalidad de la solución frente a la posible incorporación de funciones no lineales. Además, como el modelo incorpora variables enteras, estaríamos ante un problema entero y no lineal.

Por ejemplo, en el caso de las desaladoras el coste del  $m^3$  de agua es una función decreciente de la cantidad de agua desalada. Supongamos que el coste es el siguiente:

De 0 a 50  $m^3$  el coste es de 0,50 €/m<sup>3</sup>

De 50 a 80  $m^3$  el coste es de 0,45 €/m<sup>3</sup>

De 80 a 250  $m^3$  el coste es de 0,39 €/m<sup>3</sup>

En este caso, sería necesario añadir las siguientes restricciones (Ec. 6-9) que incluyen una variable binaria para cada uno de los tramos de coste indicando si se desala en ese tramo o no.

$$0 \leq X_{1dt} \leq 50Y_1 \quad (6)$$

$$51Y_2 \leq X_{2dt} \leq 80Y_2 \quad (7)$$

$$81Y_3 \leq X_{3dt} \leq 250Y_3 \quad (8)$$

$$Y_1 + Y_2 + Y_3 = 1 \quad (9)$$

De esta forma, las variables  $X_{ldt}$  representan la cantidad de  $m^3$  obtenidos en el tramo  $l$  y en la función objetivo se sustituye la parte correspondiente al coste de suministro de la desaladora en cuestión que era:

$$\sum_t \sum_k C_{kt} X_{kt} \quad (10)$$

por:

$$\sum_l \sum_t \sum_k C_{lkt} X_{lkt} \quad (11)$$

### 2.2.3. Acotación de la incertidumbre a través de la inclusión de escenarios de oferta y demanda

Un aspecto a tener en cuenta es la incertidumbre ya que algunas variables incluidas en el modelo tanto desde el lado de la oferta como de la demanda están sujetas a incertidumbre. En este sentido, frente a la

opción de considerar la disponibilidad de agua constante, se pueden plantear varios escenarios que tengan en cuenta las previsiones climáticas a corto plazo o la mejora de la eficiencia en las redes de distribución.

Desde el punto de vista de la demanda, también se pueden plantear varios escenarios que tengan en cuenta por ejemplo las previsiones climáticas (a mayor precipitación, menor necesidad de agua para riego), campañas de concienciación de ahorro de agua, reducción de la demanda debido a incrementos en las tarifas, etc.

A mayor número de escenarios considerados, mayor será la complejidad del modelo a resolver, pero lo cierto es que se dispondrá de información más próxima a la realidad mejorando considerablemente la gestión de los recursos hídricos disponibles de la demarcación hidrográfica objeto de estudio.

### **3. Caso de estudio: Demarcación Hidrográfica del Segura**

El modelo desarrollado ha sido aplicado en la Demarcación Hidrográfica del Segura (DHS) cuya extensión es de 18.870 Km<sup>2</sup>. La precipitación media anual en la DHS es de unos 400 mm, caracterizada por grandes desequilibrios espaciotemporales y un claro contraste entre las zonas de cabecera y las partes medias y bajas de la cuenca. La población permanente asciende a unos 1.850.000 habitantes (CHS, 2013).

En relación a la demanda, las actividades agrícolas representan la principal presión sobre los recursos hídricos siendo la demanda bruta anual para riego de la DHS de unos 1.660 hm<sup>3</sup> lo cual representa el 85% de la demanda total. La demanda de agua para uso urbano es de unos 185 hm<sup>3</sup>/año a la que hay que añadir una demanda anual adicional de 34 hm<sup>3</sup>/año asociada al sector turístico. Por lo tanto, la demanda urbana total es de 219 hm<sup>3</sup>/año. Finalmente, el sector industrial en la DHS es el que representa la menor demanda de agua cuantificada en unos 69 hm<sup>3</sup>/año (3,5% del total).

Los recursos convencionales en la DHS se cifran en 1.691 hm<sup>3</sup>/año de los cuales el 52% (871 hm<sup>3</sup>/año) son superficiales mientras que el 48% restante (820 hm<sup>3</sup>/año) son subterráneos. En lo que respecta a los recursos no renovables, la reutilización de retornos de riego está siendo utilizada desde la antigüedad por medio de azarbes y acequias con un volumen aproximado de 45 hm<sup>3</sup>/año. La reutilización de agua residual urbana regenerada se cifra aproximadamente en 51 hm<sup>3</sup>/año. Por lo tanto, el volumen total de agua reutilizada en la DHS es de unos 96 hm<sup>3</sup>/año. La cantidad total de agua desalada se estima en unos 20 hm<sup>3</sup>/año. Por lo tanto, la disponibilidad de recursos no convencionales asciende a 116 hm<sup>3</sup>/año. Finalmente, los recursos superficiales transferidos a la DHS procedentes de otras demarcaciones, tienen origen en su totalidad en la cuenca alta del Tajo. Si bien los volúmenes a trasvasar se fijaron en un máximo de 1.000 hm<sup>3</sup>/año, lo cierto es que en el año 2010/11 se trasvasaron unos 880 hm<sup>3</sup> y el año anterior la cantidad de agua transferida se cifró en 690 hm<sup>3</sup>.

Para la resolución del modelo se han considerado desde el lado de la oferta, las siguientes unidades: i) 21 fuentes de agua superficial; ii) 62 fuentes de agua subterránea; iii) 81 estaciones depuradoras de aguas residuales (EDARs) como fuentes de agua regenerada; iv) 10 estaciones desaladoras como fuente de agua desalada; y v) un tranvase. Desde la perspectiva de la demanda se han considerado: i) 70 unidades de demanda agraria (UDAs); ii) 14 unidades de demanda urbana (UDUs); y iii) 8 unidades de demanda industrial (UDIs).

El primer paso antes de proceder a la resolución del modelo fue la definición de las tres matrices: i) matriz binaria de conexión entre orígenes y destinos; ii) matriz de eficiencia en la distribución del agua; y iii) matriz de coste. Teniendo en cuenta las dimensiones de la demarcación hidrográfica estudiada y la información estadística disponible, no ha sido posible definir la eficiencia de forma individual entre cada origen y destino sino que se ha obtenido el nivel de eficiencia de forma global para el conjunto de unidades de demanda. De este modo, la estimación sobre los niveles de eficiencia es del 65% para las UDAs, del 70% para las UDIs y del 75% en el caso de las UDUs.

Por otra parte, se ha comprobado que todos los destinos pueden ser suministrados al menos por un origen y que la suma de las ofertas de las diferentes fuentes es superior a la suma de todas las demandas. De esta forma, se garantiza la factibilidad del modelo.

El modelo se ha resuelto con GAMS/CPLEX considerando un horizonte temporal de un año ya que la información estadística disponible hace referencia a este periodo de tiempo. En el caso de que el objetivo del estudio fuera evaluar los efectos de la estacionalidad sobre la asignación de agua entre los orígenes y destinos, debería haberse utilizado un horizonte temporal más corto (estación húmeda-seca o mensual).

El coste total de suministro de agua en toda la cuenca es ligeramente superior a 300 millones de euros anuales. Conviene destacar que la solución obtenida es la óptima para toda la DHS, lo que no significa que sea la óptima para todas y cada una de las subcuencas o asignaciones concretas origen-destino.

La Tabla 1 muestra el volumen de agua que cada fuente debe aportar para satisfacer las tres demandas. En el caso de las UDAs, aproximadamente el 66% de la demanda debería cubrirse con fuentes convencionales mientras que los recursos no convencionales aportarían menos del 5% del total del agua. Así mismo, destaca la importante contribución que representaría el agua procedente de otras demarcaciones hidrográficas (aproximadamente el 30%). Por el contrario, más de la mitad de la demanda industrial (52%) debería satisfacerse con recursos no convencionales. En este caso, el agua superficial y subterránea aportaría el 33% de los recursos mientras que el agua trasvasada sería aproximadamente el 15% restante. En relación a los usos urbanos, los resultados de nuestro modelo muestran que la demanda de agua debería satisfacerse mayoritariamente (93%) con recursos convencionales y que el 7% restante debería suministrarse con agua procedente del trasvase Tajo-Segura. Así, las fuentes de agua no convencionales no aportarían recursos para satisfacer este tipo de demanda (ver Figura 2).

Tabla 1. Volumen de agua ( $\text{hm}^3/\text{año}$ ) que llega a cada demanda desde cada fuente

Volumen agua ( $\text{hm}^3/\text{año}$ )	UDAs	UDIs	UDUs
Superficial	627	12	72
Subterránea	461	11	132
Reutilizada	65	31	0
Desalada	15	5	0
Trasvase	492	10	15
<b>TOTAL</b>	<b>1660</b>	<b>69</b>	<b>219</b>

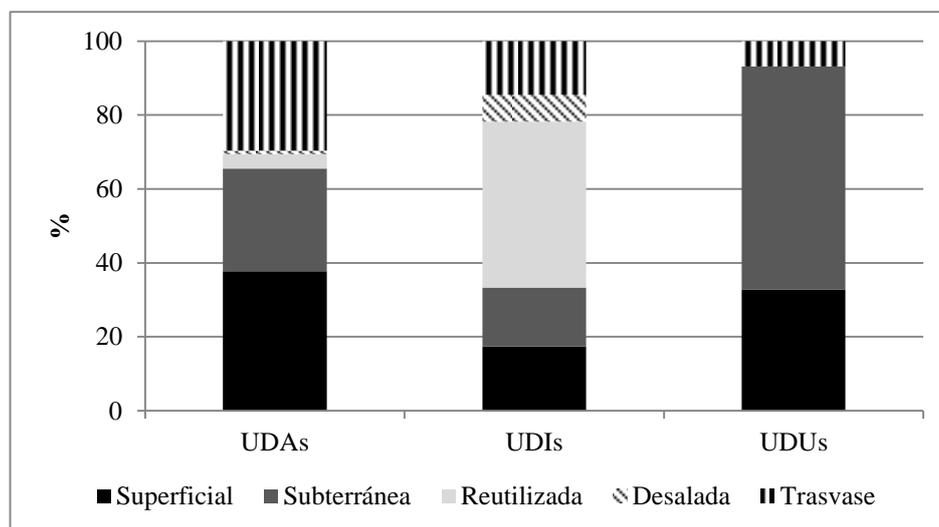


Figura. 2. Fuente de abastecimiento de agua para cada demanda

Desde el punto de vista de la oferta, los recursos convencionales (agua superficial y subterránea) y la trasvasada deberían utilizarse para satisfacer los tres tipos de demanda mientras que los no convencionales no se usarían para abastecer la demanda urbana. En el caso de la reutilización, esta era una restricción impuesta en el propio modelo ya que el RD 1620/2007 no permite el uso de agua

regenerada para uso potable. Situación contraria ocurre con el agua desalada en el sentido de que el modelo permite su uso para satisfacer la demanda urbana pero la solución del modelo recomienda la asignación de dicha agua para uso industrial y agrícola.

Sobre la base de la solución alcanzada, se han realizado una serie de simulaciones específicas con el fin de evaluar distintos escenarios. En particular, se han considerado las siguientes posibilidades:

- Mejora de la eficiencia en las UDAs pasando del 65% actual a un 66%. La disminución de las pérdidas de agua, implicaría un ahorro económico de unos 3,5 millones de euros, es decir, de un 1,15% del total. Por lo tanto, dicha cantidad de dinero podría ser invertida por parte de los usuarios y la administración para mejorar las instalaciones de riego y las redes de distribución de agua.

- Incremento de la disponibilidad de agua en algunas fuentes. La información obtenida de los multiplicadores de las restricciones permite identificar qué orígenes y qué destinos valoran más un incremento (o disminución) de una unidad adicional de agua. De forma específica, se ha elegido como origen la masa de agua superficial 9 con una disponibilidad actual de 50 hm<sup>3</sup>/año y se ha supuesto un incremento de una unidad, es decir, una disponibilidad de 51 hm<sup>3</sup> anuales. En este caso, se ha comprobado que el coste total de suministro en toda la DHS disminuiría en poco más de medio millón de euros anuales, lo que representa un 0,17% del total.

La aplicación empírica desarrollada para la DHS muestra la utilidad del modelo propuesto a la hora de planificar la gestión y asignación de recursos hídricos contribuyendo a minimizar los costes de abastecimiento de agua tanto para la demanda agrícola como industrial y urbana.

#### 4. Conclusiones

La gestión de recursos hídricos debe realizarse desde una perspectiva multidisciplinar que integre aspectos tanto técnicos como ambientales y económicos. Así, en este trabajo, proponemos un modelo global de optimización para la asignación del agua disponible entre toda la demanda con el objetivo de minimizar el coste de suministro de agua en una determinada demarcación hidrográfica.

A diferencia de otros modelos de optimización, el modelo propuesto es un modelo global ya que considera múltiples fuentes de agua (convencional y no convencional) y usuarios (agrícola, urbana e industrial). Además, el modelo no sólo integra aspectos cuantitativos sino también cualitativos ya que las posibles conexiones origen-destino están condicionadas por la calidad del agua. Por otra parte, el modelo incorpora la llamada matriz de eficiencia que informa sobre las pérdidas en las redes de distribución.

Además de las restricciones de disponibilidad de agua que implican que la oferta de recursos debe ser mayor o igual que la demanda total, se ha considerado una restricción de tipo legal en el sentido de que el Real Decreto 140/2003 establece que el volumen de agua suministrado para uso urbano debe ser mayor o igual a 100 litros/habitante•día.

El modelo propuesto ha sido aplicado a la Demarcación Hidrográfica del Segura mostrando la importancia que los recursos no convencionales tienen a la hora de satisfacer tanto la demanda agrícola como industrial. Así mismo, el modelo permite cuantificar los ahorros económicos que se obtendrían ante incrementos en la eficiencia de distribución del agua y por lo tanto, realizar valoraciones sobre la idoneidad de las inversiones.

En definitiva, el modelo propuesto representa un enfoque innovador que bajo la perspectiva de Gestión Integral de Recursos Hídricos permite mejorar la sostenibilidad en el uso del agua, especialmente en cuencas deficitarias.

#### Agradecimientos

Los autores quieren agradecer la ayuda financiera recibida por la Comisión Europea a través de los proyectos FP7-ENV-2010- 265213 y LIFE10-ENV/ES000520.

#### Referencias Bibliográficas

1. Liu, S., Konstantopoulou, F., Gikas, P. y Papageorgiou, L.G. A mixed integer optimization approach for integrated water resources management. *Computers and Chemical Engineering*. **35** (2011) 858-875.
2. Hajkowicz, S. y Collins, K. A review of multiple criteria analysis for water resource management. *Water Resources Management*. **21(9)** (2007) 1553-1566.
3. MAAMA. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Gestión sostenible de regadíos. Página web: <http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/gestion-sostenible-de-regadios/#para2> (2013)

4. Lu, H.W., Huang, G.H., Zhang, Y.M. y He, L. Strategic agricultural land-use in response to water-supplier variation in a China's rural region. *Agricultural Systems*, **108** (2012) 19-28.
5. Reca, J., Roldán J., Alcaide, M., López, R. y Camacho, E. Optimisation model for water allocation in deficit irrigation systems II. Application to the Bémbezar irrigation system. *Agricultural Water Management*, **48(2)** (2001) 117-132.
6. Rejani, R., Jha, M.K. y Panda, S.N. Simulation-optimization modelling for sustainable groundwater management in a coastal basin of Orissa, India. *Water Resources Management*, **23(2)** (2009) 235-263.
7. Han, Y., Xu, S.-G. y Xu, X.-Z. Modeling multisource multiuser water resources allocation *Water Resources Management* **22(7)** (2008) 911-923.
8. Kondili, E., Kaldellis, J.K., y Papapostolou, C. A novel systemic approach to water resources optimization in areas with limited water resources. *Desalination*, **250** (2010) 297-301.
9. Ray, P.A., Kirshen, P.H. y Vogel, R.M. Integrated optimization of a dual quality water and wastewater system, *Journal of Water Resources Planning and Management*, **136** (2010) 37-47.