

# Definición y aplicación de indicadores que relacionan el coste unitario del agua con criterios garantes del recurso hídrico

J.M. Murillo<sup>(1)</sup>, J. A. Navarro<sup>(2)</sup> y A. J. Murillo<sup>(3)</sup>

(1) Instituto Geológico y Minero de España c/ Ríos Rosas 23. 28003. Madrid. España.  
jm.murillo@igme.es

(2) ETS Ingenieros Minas. Universidad Politécnica Madrid c/ Ríos Rosas 21. 28003. Madrid. España.  
janavarro@tihgsa.net

(3) MARSH. Plaza de Castilla. 28046. Madrid.  
aj.murillo@hotmail.es

## RESUMEN

En el presente artículo se definen una serie de indicadores absolutos y relativos que permiten relacionar el coste unitario del agua "en alta" con índices garantes (garantía mensual, garantía volumétrica y Máximo Déficit Mensual) asociados a diferentes tipos de demandas del recurso hídrico. La determinación de dichos índices se realiza mediante la aplicación de un modelo para la simulación del uso conjunto de agua superficial, subterránea y no convencional, que tiene presente el caudal ambiental, que debe circular por los ríos del sistema de explotación. El escenario de gestión que proporciona los mejores resultados es aquel que minimiza el coste unitario del agua y el máximo déficit mensual al tiempo que maximiza la garantía mensual y la volumétrica, tanto para usos consuntivos como no consuntivos. La metodología desarrollada se ha aplicado al caso particular del sistema de recursos hídricos Quiebrajano-Víboras (Jaén-España).

Palabras clave: caudal ambiental, gestión integral, indicador económico y costes del agua, uso conjunto

## ***Cost guarantee indicator. Definition and uses in water resources***

### ABSTRACT

*The present article describes a series of absolute and relative indicators that allow the unitary cost of water to be related with guarantee indexes (monthly guarantee, volumetric guarantee, and Maximum Monthly Deficit) of water resources. The determination of these indexes entailed the application of a model of joint use of surface water, groundwater, and non-conventional sources, which accounts for the environmental flow that should circulate through the rivers of the system. The scenario that provides the best results is that minimizing the unitary cost of the water and the maximum monthly deficit while at the same time maximizing monthly guarantee and volumetric guarantee, both for consumptive and non-consumptive uses (environmental flow). The methodology developed was applied to a particular case of a system of water resources: the Quiebrajano-Víboras system (Jaén Province, southern Spain).*

*Key words: conjunctive use, environmental flow, economic indicator and water costs, integrated management*

## **Antecedentes**

La Directiva Marco europea del Agua (DMA) requiere (art. 5 y Anexo III) que todos los países miembros realicen un Análisis Económico del Uso del Agua en cada Demarcación Hidrográfica (DOCE, 2000). Este mandato tiene entre otros fines obtener información que permita aplicar el principio de recuperación de los costes de los servicios relacionados con el agua, incluidos los costes medioambientales (art. 9, DMA). La Universidad Politécnica de Valencia, mediante la realización de dos tesis doctorales, ha diseñado un modelo hidrológico-económico, que realiza múltiples

simulaciones y evaluaciones económicas de los sistemas de recursos hídricos (Andreu et al, 2004). Dicha herramienta se ha desarrollado como un módulo específico del Sistema Soporte de Decisión (SSD) AQUATOOL (Andreu et al, 1996). Para poder aplicar la metodología de cálculo se ha desarrollado el código MEValGes (Múltiples Evaluaciones de la Gestión) (Pulido-Velázquez, 2003 y Collazos, 2004). Dado que el uso de MEValGes es complejo, se ha construido en Visual Basic 6.0 una interfaz gráfica (Collazos, 2004), que se ha denominado Gestal, que facilita la introducción de los datos y el análisis de los resultados.

Esta última utilidad se aplica a partir del esquema

del Sistema de Recursos Hídricos (SRH) que previamente es necesario diseñar sobre el SSD Aquatool para poder realizar la simulación de la gestión hídrica, pero podría ser acoplada a cualquier otro SSD similar al Aquatool tal como: SIM-V (Martin, 1983), MODSIM (Labadie, 1994), ACRES (ACRES, 1998), DWRSIM (Cheng et al, 1998), LabSid-AquaNet (Alexandre y Porto, 2000), MIKE BASIN (DHI, 2001), REALM (VUT, 2001), WEAP (Raskin et al, 2001), SSD H2O (Collazos, 2006).

En el presente artículo se aborda el análisis comparativo de los costes económicos relativos a diferentes escenarios de gestión de un sistema de recursos hídricos, mediante la aplicación y definición de indicadores que relacionan el coste unitario del agua con criterios garantes del recurso hídrico. El análisis de garantías se realiza mediante la aplicación del módulo SIMGES (Andreu y Capilla, 1993). La metodología desarrollada se aplica al caso particular del sistema de recursos hídricos Quiebrajano-Víboras que se localiza en la provincia española de Jaén (figura 1).

### Metodología

Considérese un sistema de uso conjunto de agua superficial, subterránea y no convencional constituido

por varias fuentes de suministro sobre el que cabe realizar diferentes escenarios de simulación de la gestión hídrica. El número de fuentes de suministro ( $i$ ) puede variar entre 1 y  $n$ , y los escenarios de simulación ( $j$ ) entre 1 y  $p$ . Para un determinado escenario de simulación, el coste unitario del agua ( $C_j$ ) vendrá dado por:

$$C_j = \frac{\sum_{i=1}^n VS_i \cdot t_{ij}}{\sum_{i=1}^n VS_i} \quad (1)$$

Donde:

$VS_i$  es el volumen anual medio que se suministra desde la fuente  $i$  ( $i= 1...n$ ) en el escenario de simulación  $j$ , siendo  $n$  el número total de fuentes de agua que pueden participar en el suministro, y  $t_{ij}$  la tarifa en alta del volumen unitario de agua suministrado por la fuente de suministro  $i$  en el escenario de simulación  $j$ .

Ahora bien, cuando la tarifa en alta de una fuente de agua  $i$  ( $i = 1...n$ ) es la misma para cualquier escenario de simulación  $j$ , la expresión (1) se simplifica y viene dada por:



Figura 1. Localización del sistema de recursos hídricos Quiebrajano-Víboras que está constituido por la mancomunidad del Quiebrajano y los pueblos de la comarca de Martos

Figure 1. Location of the hydric resources system in Quiebrajano-Víboras, which is made up by the joint association of Quiebrajano and the towns of Martos region

$$C_j = \frac{\sum_{i=1}^N VS_i \cdot t_i}{\sum_{i=1}^N VS_i} \quad (2)$$

$$c_{m_j} = \frac{C_j}{G_{m_j}} \quad (3)$$

En cada uno de los escenarios de simulación  $j$  que se analicen intervendrá un número diferente de fuentes de agua para la satisfacción de la demanda del sistema. La bondad con la que ésta queda cubierta en cada escenario de simulación  $j$  se puede evaluar a través de la garantía mensual  $G_{m_j}$ , la garantía volumétrica  $G_{v_j}$  y el máximo déficit mensual  $MDM_j$ . El escenario que proporciona los mejores resultados de  $G_{m_j}$ ,  $G_{v_j}$  y  $MDM_j$  no tiene por qué ofrecer un menor coste unitario del agua o viceversa, por lo que es necesario buscar una solución que minimice el coste unitario del agua y el máximo déficit mensual, al tiempo que maximiza la garantía mensual y la volumétrica.

Para lograr este objetivo se han definido en el presente trabajo una serie de indicadores absolutos y relativos, cuya funcionalidad se explica a continuación.

Tanto los indicadores absolutos como los relativos pretenden ofrecer información directa de cómo la mejora que se consigue en la satisfacción de las demandas de un determinado sistema de explotación de recursos hídricos, asociada a la imposición de un determinado escenario de gestión, influye sobre el coste unitario del agua, valorando la mejora mediante una serie de indicadores de garantía. La expresión matemática fijada para estos indicadores implica que un valor mínimo para estos parámetros responde a la situación coste-garantías más óptima.

### Indicadores absolutos

Han sido definidos tres indicadores absolutos, en función de que se compare el coste unitario del agua con cada uno de los tres indicadores de garantía comúnmente utilizados para valorar la eficacia de un determinado escenario de gestión: garantía mensual, garantía volumétrica o máximo déficit mensual.

De manera que estos indicadores constituyen una herramienta útil para evaluar como, en un determinado escenario de simulación, la variación en los índices de garantía influyen sobre el coste del agua.

- *Indicador de coste unitario-garantía mensual.* Este indicador ( $c_{m_j}$ ) se ha definido como el cociente entre el coste unitario del agua ( $C_j$  en €/m<sup>3</sup>) para el escenario de simulación  $j$  y el índice de garantía mensual ( $G_{m_j}$ ) en dicho escenario de simulación. Viene dado por la siguiente expresión:

El valor a considerar como garantía mensual para un determinado escenario de simulación ( $G_{m_j}$ ) correspondería al valor mínimo de los valores obtenidos para los indicadores de garantía mensual asociados a las diferentes demandas incluidas en el sistema.

- *Indicador de coste unitario-garantía volumétrica.* Este indicador ( $c_{v_j}$ ) se ha definido como el cociente entre el coste unitario del agua ( $C_j$  en €/m<sup>3</sup>) en el escenario de simulación  $j$  y el índice de garantía volumétrica ( $G_{v_j}$ ) en dicho escenario de simulación.

$$c_{v_j} = \frac{C_j}{G_{v_j}} \quad (4)$$

El valor a considerar como garantía volumétrica para un determinado escenario de simulación ( $G_{v_j}$ ) correspondería al valor mínimo de los valores obtenidos para los indicadores de garantía volumétrica asociados a las diferentes demandas incluidas en el sistema.

- *Indicador de coste unitario-máximo déficit mensual.* Este indicador ( $c_{d_j}$ ) se ha definido como el producto entre el coste unitario del agua ( $C_j$  en €/m<sup>3</sup>) en el escenario de simulación  $j$  y el máximo déficit mensual ( $MDM_j$  en hm<sup>3</sup>/mes) para dicho escenario de simulación.

$$c_{d_j} = C_j \cdot MDM_j \quad (5)$$

El valor a considerar como máximo déficit mensual para un determinado escenario de simulación ( $MDM_j$ ) correspondería al valor máximo de la suma de los déficit mensuales obtenidos para las diferentes demandas incluidas en el sistema.

### Indicadores relativos

Los indicadores relativos constituyen una herramienta útil para llevar a cabo análisis comparativo de diferentes escenarios de gestión derivados de la simulación del uso conjunto de un determinado sistemas de explotación, considerando de forma combinada

aspectos relativos a indicadores de satisfacción de demandas y el coste unitario del agua.

Los indicadores relativos incluyen una función de normalización que permite la comparación de varios escenarios de gestión y establecer una clasificación de los mismos. Asimismo, estos indicadores relativos serían incorporables a las funciones multi-objetivo que son empleadas en la optimización que se efectúa en los modelos de simulación de la gestión conjunta.

- *Indicador relativo coste unitario-garantía mensual.* Este indicador ( $cg_{m_j}$ ) se ha definido mediante la expresión:

$$cg_{m_j} = \left( \frac{C_j}{C_{min}} \right) \cdot \left( \frac{G_{m,máx}}{G_{m_j}} \right) \quad (6)$$

Donde:  $C_j$  es coste unitario del agua ( $\text{€/m}^3$ ) para el escenario de simulación  $j$ ,  $C_{min}$  el mínimo coste unitario del agua ( $\text{€/m}^3$ ) que se obtiene en los  $p$  escenarios de simulación que se analizan,  $G_{m_j}$  la garantía mensual para el escenario de simulación  $j$ , y  $G_{m,máx}$  la máxima garantía mensual que se obtiene en los  $p$  escenarios de simulación que se analizan. La expresión (6), si se tiene en cuenta expresión (3), se transforma en:

$$cg_{m_j} = c_{m_j} \cdot \left( \frac{G_{m,máx}}{C_{min}} \right) \quad (7)$$

- *Indicador relativo coste unitario-garantía volumétrica.* Este indicador ( $cg_{v_j}$ ) se ha definido mediante la expresión:

$$cg_{v_j} = \left( \frac{C_j}{C_{min}} \right) \cdot \left( \frac{G_{v,máx}}{G_{v_j}} \right) \quad (8)$$

Donde:  $C_j$  es el coste unitario del agua ( $\text{€/m}^3$ ) para el escenario de simulación  $j$ ,  $C_{min}$  el mínimo coste unitario del agua ( $\text{€/m}^3$ ) que se obtiene en los  $p$  escenarios de simulación que se analizan,  $G_{v_j}$  la garantía volumétrica para el escenario de simulación  $j$ , y  $G_{v,máx}$  la máxima garantía volumétrica que se obtiene en los  $p$  escenarios de simulación que se analizan.

La expresión (8), si se tiene en cuenta expresión (4), se transforma en:

$$cg_{v_j} = c_{v_j} \cdot \left( \frac{G_{v,máx}}{C_{min}} \right) \quad (9)$$

- *Indicador relativo coste unitario-máximo déficit mensual.* Este indicador ( $cg_{d_j}$ ) se ha definido mediante la expresión:

$$cg_{d_j} = \left( \frac{C_j}{C_{min}} \right) \cdot \left( \frac{MDM_j}{MDM_{min}} \right) \quad (10)$$

Donde:  $C_j$  es el coste unitario del agua ( $\text{€/m}^3$ ) para el escenario de simulación  $j$ ,  $C_{min}$  el mínimo coste unitario del agua ( $\text{€/m}^3$ ) que se obtiene en los  $p$  escenarios de simulación que se analizan,  $MDM_{min}$  el mínimo déficit mensual que se obtiene en los  $p$  escenarios de simulación que se analizan, y  $MDM_j$  el máximo déficit mensual para el escenario de simulación  $j$ .

Y si se tiene en cuenta la expresión (5) en:

$$cg_{d_j} = \left( \frac{c_{d_j}}{C_{min}} \right) \cdot \left( \frac{1}{MDM_{min}} \right) \quad (11)$$

- *Indicador relativo coste unitario-garantía.* Este indicador ( $cg_{g_j}$ ) se ha definido mediante la expresión:

$$cg_{g_j} = \sqrt[3]{cg_{m_j} \cdot cg_{v_j} \cdot cg_{d_j}} \quad (12)$$

Donde:  $cg_{m_j}$  es el indicador relativo coste unitario-garantía mensual para el escenario de simulación  $j$ ,  $cg_{v_j}$  es el indicador relativo coste unitario-garantía volumétrica para el escenario de simulación  $j$ ,  $cg_{d_j}$  es el indicador relativo coste unitario-máximo déficit mensual para el escenario de simulación  $j$ . Este último indicador pretende ser un resumen de los tres indicadores relativos definidos, de forma que mediante un solo indicador se aglutine toda la información relativa a indicadores de garantía y costes unitarios del agua, lo que facilita la comparativa de escenarios de simulación considerados. La expresión (12), si se tienen en cuenta las expresiones (7), (9) y (11), se transforma en:

$$cg_j = \sqrt[3]{c_{m_j} \cdot \left(\frac{G_{m,\max}}{C_{\min}}\right) \cdot c_{v_j} \cdot \left(\frac{G_{v,\max}}{C_{\min}}\right) \cdot \left(\frac{c_{d_j}}{C_{\min}}\right) \cdot \left(\frac{1}{MDM_{\min}}\right)}$$

(13)

Operando en la expresión (13) resulta:

$$cg_j = \frac{1}{C_{\min}} \sqrt[3]{c_{m_j} \cdot c_{v_j} \cdot G_{m,\max} \cdot G_{v,\max} \cdot MDM_j}$$

(14)

Y si se tienen en cuenta las expresiones (3), (4) y (5), operando se obtiene:

$$cg_j = \frac{C_j}{C_{\min}} \sqrt[3]{\frac{G_{m,\max}}{G_{m_j}} \cdot \frac{G_{v,\max}}{G_{v_j}} \cdot \frac{MDM_j}{MDM_{\min}}}$$

(15)

En los cálculos que se han realizado en el presente artículo se ha utilizado la expresión (15). Una vez definidos estos indicadores se tendrá que el mejor escenario posible es aquel que minimiza un mayor número de indicadores absolutos y relativos.

El cálculo de los indicadores precisa de la construcción de un modelo de gestión que permita determinar los índices garantes del sistema (garantía mensual, garantía volumétrica y Máximo Déficit Mensual).

La metodología que se ha empleado para la construcción de dicho modelo de gestión ha sido la recomendada por Sahuquillo y Sánchez González (1983). Ésta se concreta en la realización de una serie de acciones concatenadas:

- Cálculo de las aportaciones (superficiales y subterráneas) que registra el sistema de recursos hídricos en régimen natural.
- Caracterización de las infraestructuras hidráulicas referidas tanto al almacenamiento superficial (embalses) como al subterráneo (acuíferos) y a las infraestructuras de conexión entre los distintos elementos que conforman el sistema de recursos hídricos.
- Análisis de las posibilidades de utilización de recursos no convencionales (aguas desaladas y aguas depuradas).
- Cuantificación de las demandas consuntivas y no consuntivas.

- Modelación matemática, simulación de las alternativas de gestión y cálculo de los índices de garantía.

Por lo que respecta a la forma de tratar el caudal ambiental, aunque bajo el punto de vista legal tiene carácter de restricción, desde la operativa del paquete informático AQUATOOL se puede tratar bien como restricción o bien como demanda. Ambas formas de actuar son matemáticamente correctas, aunque la segunda, que ha sido la adoptada en el presente artículo, reúne un mayor número de ventajas.

### Aplicación práctica al sistema de recursos hídricos Quiebrajano-Víboras

Para la construcción de dicho modelo matemático es necesario definir el modelo conceptual de sistema hídrico y formular hipótesis de simulación que respondan a la realidad con la que se puede optimizar el funcionamiento del mismo.

#### Modelo conceptual y esquema de funcionamiento del sistema de recursos hídricos

El sistema de recursos hídricos Quiebrajano-Víboras se estructuraba hasta hace muy poco tiempo de acuerdo a dos grandes sistemas de abastecimiento de tipo supramunicipal, independientes entre sí, que se denominaban Mancomunidad del Quiebrajano y Comarca de Martos; y a una serie de pequeños sistemas de abastecimiento de índole municipal (Los Villares, Alcaudete, Fuensanta de Martos y Valdepeñas de Jaén).

Las fuentes de suministro de La Mancomunidad de abastecimiento del Quiebrajano son: el embalse del Quiebrajano; las captaciones de agua subterránea de los sondeos de La Merced y la elevación de una parte del agua que se descarga a través de los manantiales de Mingo (figura 2). En el caso particular del abastecimiento a la ciudad de Jaén (figura 3) las anteriores fuentes de suministro se complementan con una serie de sondeos (Santa Catalina, el Tomillo y Peñas de Castro) perforados en los acuíferos de Castillo-La Ímora y Grajales, y con parte del agua que se transfiere a través del canal de los Villares desde el manantial de río Frío (figura 3).

El sistema de abastecimiento de tipo supramunicipal de la Comarca de Martos (figura 4), que también se conoce con el nombre de Canal de Martos, se nutre de la captación de una serie de manantiales (Papel Baja, Papel Alta, Valdepeñas y Chircales) que drenan los acuíferos de Montesinos, Cornicabra-

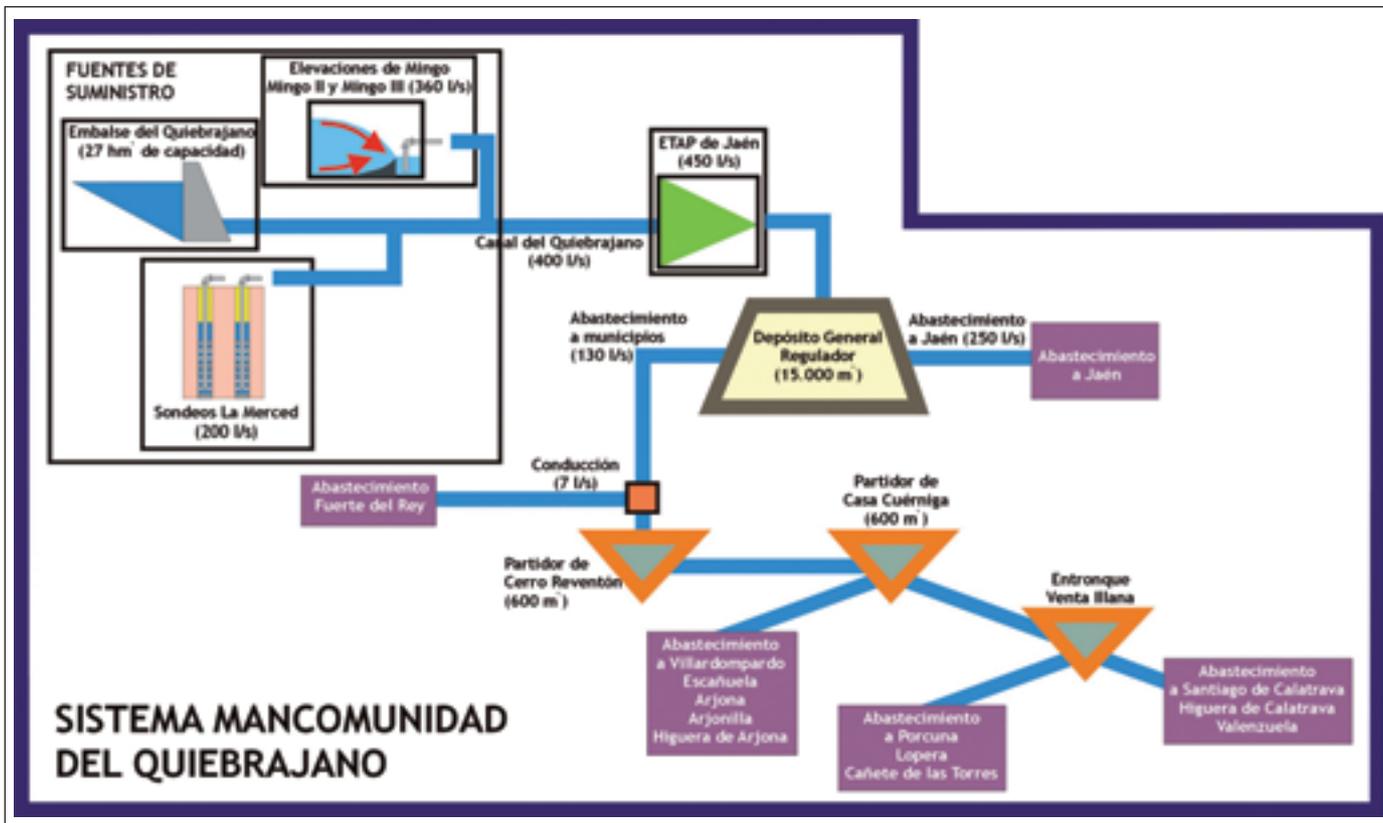


Figura 2. Esquema topológico del sistema de abastecimiento de la Mancomunidad del Quiebrajano  
 Figure 2. Topology diagram of Quiebrajano joint association water supply system

Noguerones y Ventisquero, y son el soporte hídrico de la cuenca alta del río Víboras (arroyo del Papel, río Susana y arroyo los Corteses). Estos manantiales se conocen con el nombre de Fuentes de Martos. El abastecimiento a la Comarca de Martos se complementa con el agua que se extrae a través de una serie de sondeos (sondeos del Víboras), que captan el acuífero de Gracia-Morenita. En dicho acuífero se ha construido una instalación de recarga artificial que puede aprovechar los excedentes invernales que se producen en la cuenca alta del río Víboras.

Las anteriores fuentes de agua no resultan suficientes para satisfacer la demanda de abastecimiento de la ciudad de Martos, por lo que se precisa apoyarlas con otros recursos subterráneos que se extraen del acuífero Dogger de Jabalruz a través de un sondeo que regula el manantial de la Maleza. Otros municipios de la Comarca de Martos, como los de Jamilena, Torredonjimeno y Torredelcampo, también necesitan que su abastecimiento se complemente con otras fuentes de agua de origen subterráneo. Éstas se localizan y captan mediante sondeos en los acuíferos de Dogger de Jabalruz y Cerro Fuente.

El sistema de abastecimiento de índole municipal de Los Villares se realiza desde el manantial de río Frío (figura 3). El sistema de abastecimiento de índole municipal de Alcaudete se efectúa desde el acuífero de Ahillo a través del sondeo de cerro La Cal, y los abastecimientos a las pedanías de Bobadilla y Noguerones mediante un sondeo que regula el manantial de Fuente la Higuera, que es la descarga natural del acuífero Caracolera. Los abastecimientos de índole municipal de Valdepeñas de Jaén y Fuensanta de Martos se realizan: el primero mediante la captación del manantial de Vadillo, que drena el acuífero de Ventisqueros, y el segundo mediante la captación del manantial de Encinar, La Fuente del río y La Fuente Negra, que drenan el acuífero de Mentidero.

A partir del año 2004 se interconectan los sistemas de abastecimiento del Quiebrajano y Comarca de Martos de acuerdo al esquema de gestión que se muestra en la figura 7. Dicho esquema incorpora nuevos elementos de gestión como son el embalse del Víboras; una conducción de conexión entre éste y la Estación de Tratamiento de Aguas Potables (ETAP) de

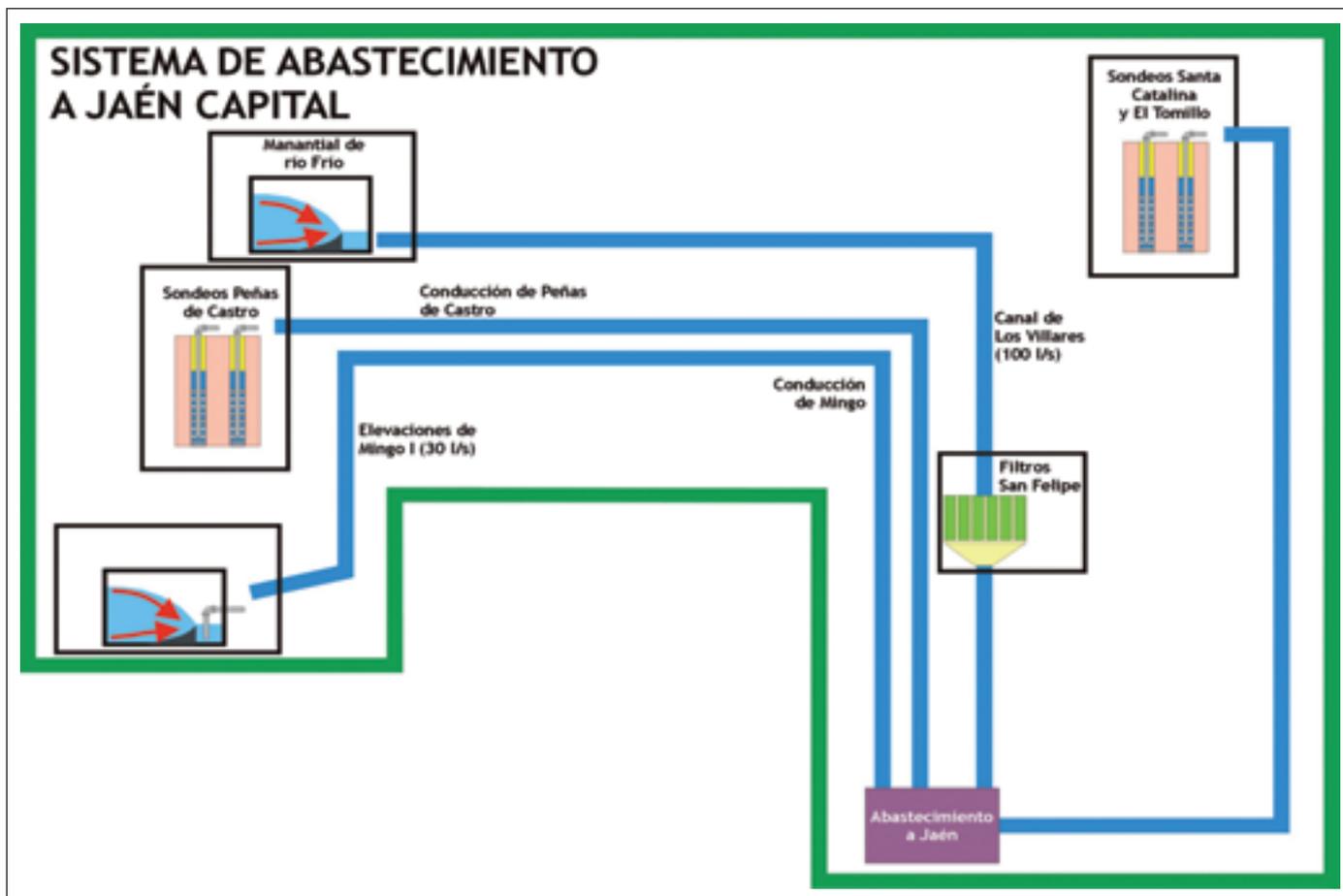


Figura 3. Esquema topológico del sistema de abastecimiento a la ciudad de Jaén que complementa al mancomunado del Quebrajano  
 Figure 3. Topology diagram of the supply system of the city of Jaén that complements the joint system of Quebrajano

Martos; un nuevo módulo de potabilización en esta última que incrementa su capacidad de tratamiento; una conducción de conexión entre las fuentes de Martos, los sondeos del Víboras y la ETAP de Martos; y una serie de actuaciones en la conducción que lleva agua desde el embalse del Quebrajano hasta la ETAP de Jaén, que permite aumentar su capacidad de transporte. Con este nuevo esquema de gestión no es necesario hacer uso de los sondeos que apoyan el abastecimiento a Jamilena, Torredonjimeno y Torredelcampo (figuras 6 y 7), lo que favorece la recuperación de los acuíferos Dogger de Jabalruz y Cerro Fuente, que se encuentran en el límite de su explotación controlada (Murillo y Navarro, 2008).

#### **Escenarios de simulación de la gestión conjunta**

Se han planteado dos escenarios de simulación de la gestión conjunta que se han denominado:

- **Situación sin conexión**

Responde a un esquema de aprovechamiento donde los sistemas supramunicipales de la Mancomunidad del Quebrajano y la Comarca de Martos se gestionan por separado. El sistema de abastecimiento de índole municipal de Los Villares se trata en el modelo matemático conjuntamente con el sistema supramunicipal de la Mancomunidad del Quebrajano, ya que la satisfacción de la demanda del primero detrae agua al segundo (figuras 2 y 3), y los sistemas de abastecimiento de índole municipal de Alcaudete, Fuensanta de Martos y Valdepeñas de Jaén con el sistema supramunicipal de la Comarca de Martos, ya que dichos sistemas de abastecimiento de índole municipal se encuentran interrelacionados en mayor o menor medida con el sistema supramunicipal de abastecimiento de la Comarca de Martos. A la primera unión se la ha denominado Mancomunidad del Quebrajano y a la segunda

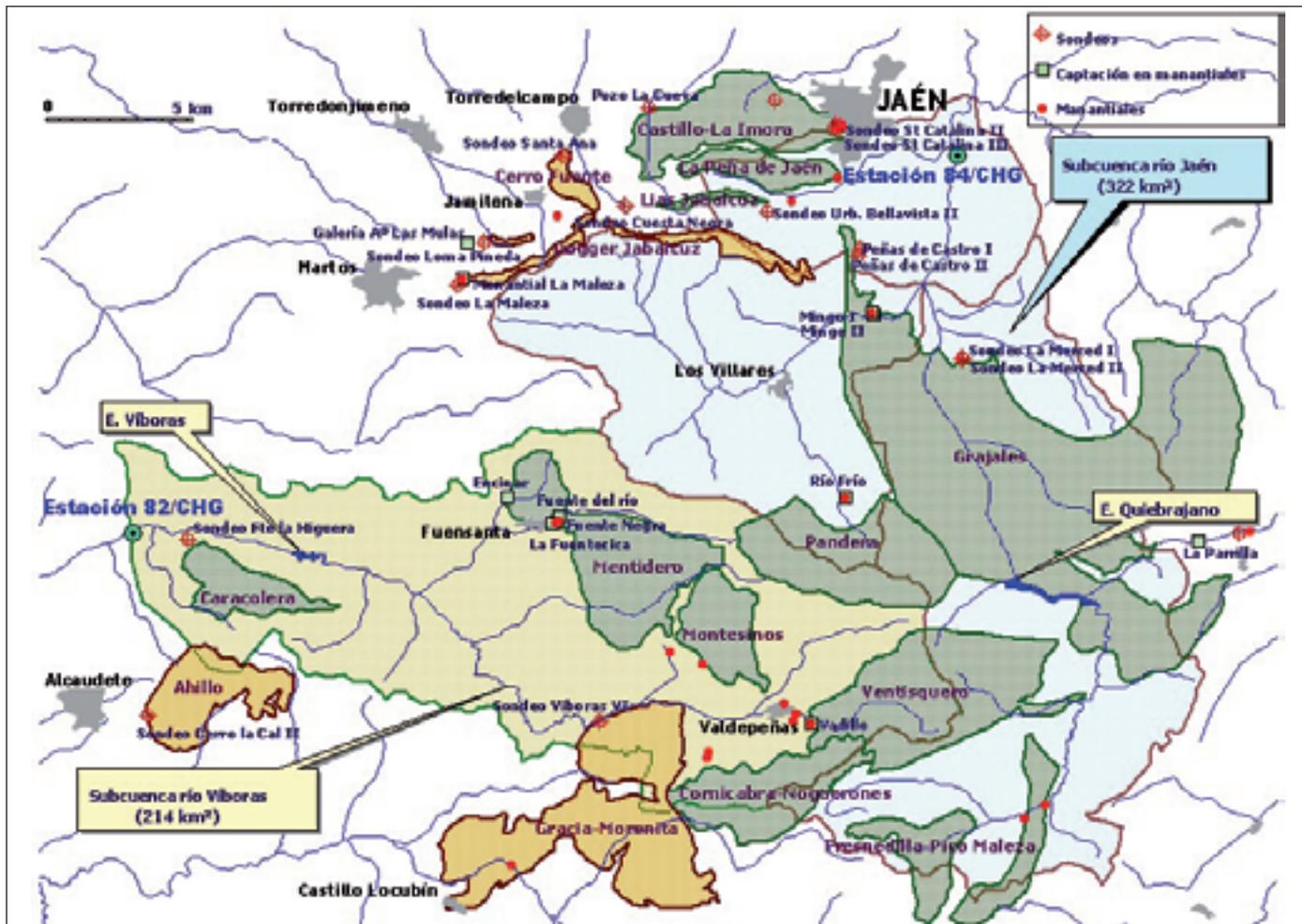


Figura 4. Fuentes de agua empleadas en el abastecimiento urbano del sistema de recursos hídricos Quiebrajano-Víboras  
 Figure 4. Water sources used in the urban supply of the hydric resources system in Quiebrajano-Víboras

Comarca de Martos. Este escenario de simulación responde a la situación que existía previamente a la interconexión en el año 2004 de los dos sistemas supramunicipales de abastecimiento de la Mancomunidad del Quiebrajano y la Comarca de Martos.

- **Situación con conexión**  
 Corresponde a la situación de interconexión de los sistemas supramunicipales de la Mancomunidad del Quiebrajano y la Comarca de Martos mediante un canal reversible, que permite pasar agua de uno a otro sistema según las necesidades y disponibilidades de cada momento. En este escenario de simulación se hace uso del embalse del Víboras; la conducción de conexión entre éste y la ETAP de Martos; la conducción de conexión entre las fuentes de Martos, los sondeos del Víboras y la ETAP de Martos; la conducción del embalse del

Quiebrajano a la ETAP de Jaén una vez mejorada e incrementada su capacidad de transporte; y del segundo módulo de potabilización de la ETAP de Martos. Los sistemas de abastecimiento de índole municipal se han tratado en este escenario de igual forma que en el anterior.

- Para este último escenario de simulación se han diseñado dos variantes:  
 • **Variante sin puesta en funcionamiento del embalse del Víboras.**  
 Corresponde a una situación análoga a la que se presenta en el escenario que se ha denominado SITUACIÓN CON CONEXIÓN, pero en esta variante se baraja la hipótesis de que no se hubiera construido el embalse del Víboras, ni la conducción de conexión entre éste y la ETAP de Martos, por lo que la demanda de agua a satisfacer desde dicho embalse se sustituye por una explotación más

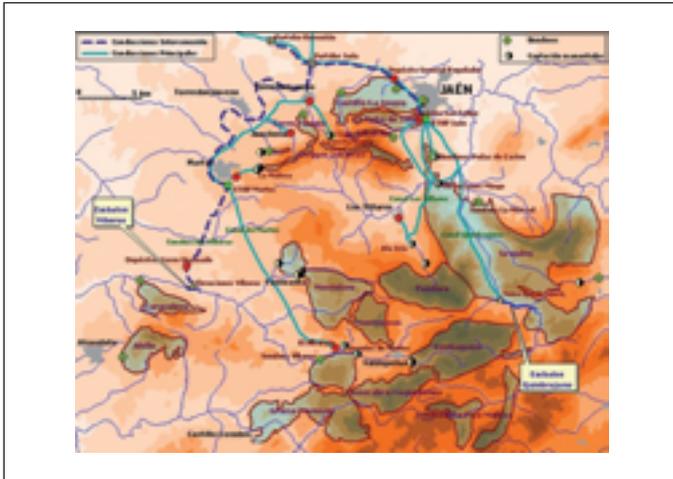


Figura 5. Infraestructuras de almacenamiento superficial (embalses), almacenamiento subterráneo (acuíferos), conducción y potabilización empleadas en el abastecimiento urbano del sistema de recursos hídricos Quiebrajano-Víboras

Figure 5. Surface storage infrastructures (reservoirs), underground storage (aquifers), channeling and purification used in the urban supply of Quiebrajano-Víboras hydric resources system

intensa de los recursos del acuífero de Gracia-Morenita. El resto del sistema funcionaría igual que en el ESCENARIO SITUACIÓN CON CONEXIÓN.

- *Variante impermeabilización del embalse del Quiebrajano.*

Corresponde a una situación idéntica a la que se presenta en el escenario que se ha denominado SITUACIÓN CON CONEXIÓN, pero en esta variante se impermeabilizaría totalmente el vaso del embalse del Quiebrajano.

En la Tabla 1 se indican los principales elementos del sistema de recursos hídricos que intervienen en cada escenario de simulación.

En la Tabla 2 se muestran las principales fuentes de suministro, su capacidad de regulación máxima y las demandas promedio anual que debe ser satisfechas.

### Modelo matemático

El modelo matemático de simulación de la gestión hídrica (uso conjunto) se ha abordado mediante la aplicación del código SIMGES de acuerdo a la metodología establecida por Sahuquillo y Sánchez-González (1983) para este tipo de proyectos.

Como aportación novedosa con respecto a la metodología anteriormente reseñada cabe formular

que en todas las hipótesis de simulación se ha considerado el mantenimiento de un caudal ambiental en los ríos del sistema. Éste se ha estimado mediante la aplicación de la metodología IFIM (Bovee, 1982; García de Jalón, 1990) y los cálculos se han realizado de tal forma que responden al concepto de régimen de caudal ambiental de tipo variable (Baeza y Vizcaíno, 2008).

Otra aportación que también complementa la metodología propuesta por Sahuquillo y Sánchez-González (1983) es la inclusión del caudal ambiental como una demanda con máxima priorización frente al resto de las otras demandas, salvo cuando la demanda urbana no se satisface con la garantía adecuada. En este caso se invierte el orden entre la demanda ambiental y urbana.

En el presente artículo no se analiza ni presenta la operativa que se ha llevado a cabo para la construcción del modelo de simulación, pues conlleva un desarrollo extenso y complejo, que escapa al objetivo del mismo.

La metodología, operativa y cálculos realizados para la construcción del modelo, así como de los resultados obtenidos se encuentran en los trabajos que se relacionan a continuación: "Empleo de modelos de análisis global de recursos hídricos como primera actuación a emprender en propuestas de gestión que contemplen operaciones de recarga artificial de acuíferos" (Murillo y Navarro, 2008); "Caudales ecológicos y gestión conjunta de recursos hídricos. Aplicación al sistema Quiebrajano-Víboras (Jaén)" (Murillo y Navarro, 2006); "Mantenimiento hídrico de cursos fluviales y uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas. Aplicación al sistema de explotación Quiebrajano-Víboras (Jaén)" (Murillo et al, 2005); y "Elaboración de directrices para la incorporación de criterios de calidad en la modelización de esquemas de utilización conjunta. Aplicación al abastecimiento del conjunto Quiebrajano-Víboras" (IGME-AAA, 2005). En el caso concreto del sistema de recursos hídricos Quiebrajano-Víboras sólo cabe considerar dos escenarios de simulación con las variantes apuntadas anteriormente.

### Análisis de resultados

En la Tabla 3 se muestran los volúmenes anuales medios con los que participa cada agrupación de fuentes de agua  $i$  en cada escenario de simulación  $j$ . Dichos volúmenes se han obtenido mediante la aplicación del código SIMGES.

En la Tabla 4 se muestra el coste del agua suministrada por cada una de las agrupaciones de fuentes

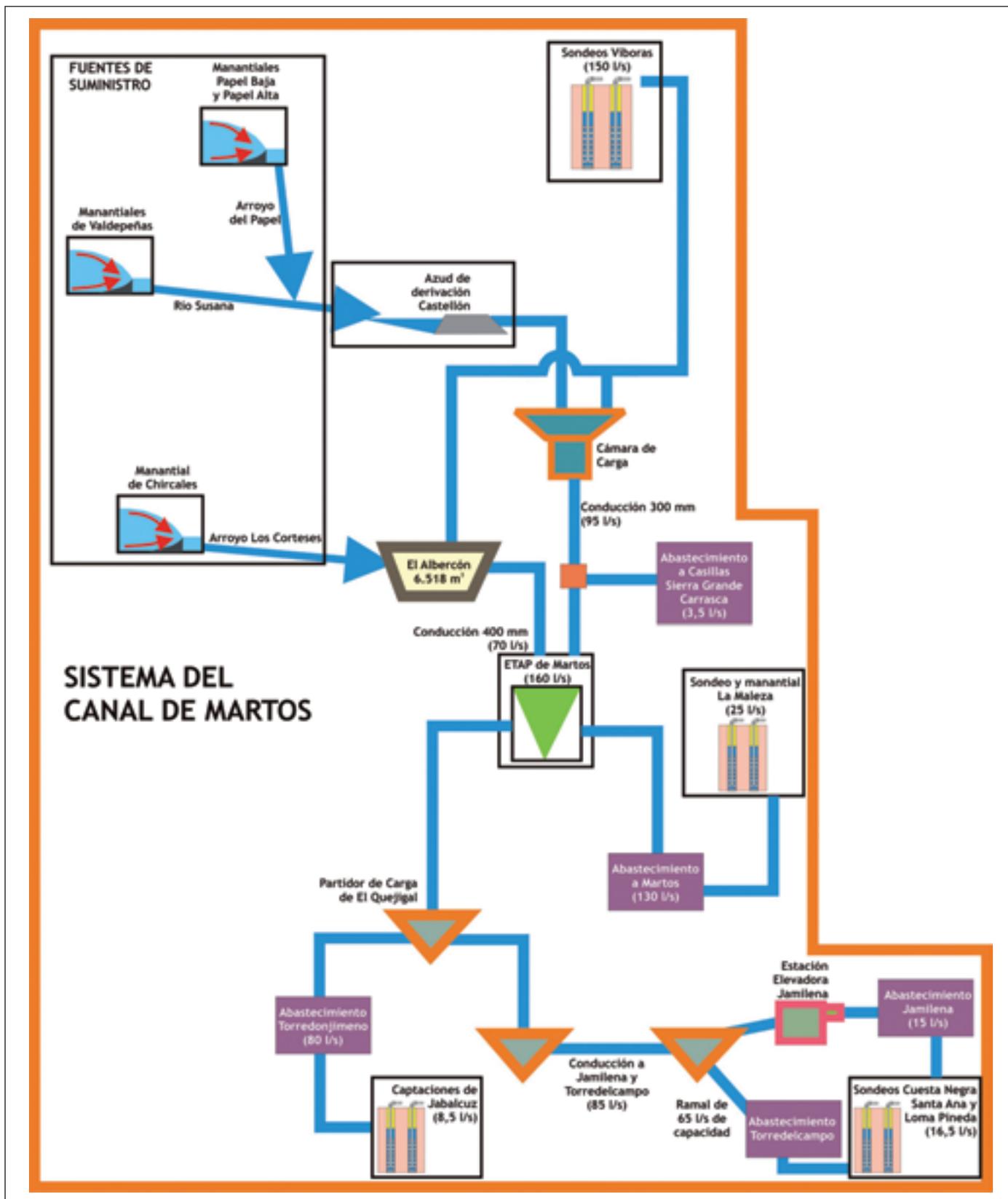


Figura 6. Esquema topológico del sistema de abastecimiento del canal de Martos  
 Figure 6. Topology diagram of Martos canal supply system

Principales Elementos del Sistema de Recursos Hídricos que Intervienen en Cada Escenario de Simulación	Escenarios de Simulación			
	SITUACIÓN SIN CONEXIÓN	SITUACIÓN CON CONEXIÓN	VARIANTE SIN PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL EMBALSE DEL VÍBORAS	VARIANTE IMPERMEABILIZACIÓN DEL EMBALSE DEL QUIEBRAJANO
Conexión sistemas supramunicipales de la Mancomunidad del Quebrajano y la Comarca de Martos	NO	SI	SI	SI
Embalse del Víboras	NO	SI	NO	SI
ETAP de Martos con un módulo de potabilización	SI	NO	NO	NO
ETAP de Martos con dos módulos de potabilización	NO	SI	SI	SI
Conexión Embalse del Víboras - ETAP de Martos	NO	SI	NO	SI
Sondeos del Víboras (capacidad máxima de Bombeo 154 l/s)	SI	SI	SI	SI
Conexión sondeos del Víboras-ETAP de Martos	NO	SI	SI	SI
Recarga artificial Gracia-Morenita	SI	SI	SI	SI
Captación de los manantiales del Papel Baja, Papel Alta, Valdepeñas y Chircales	SI	SI	SI	SI
Captación y regulación mediante sondeos del manantial de la Maleza	SI	SI	SI	SI
Sondeos de Cuesta Negra, Santa Ana, Loma Pineda y Jabalcuz	SI	NO	NO	NO
Embalse del Quebrajano	SI	SI	SI	SI
Impermeabilización del embalse del Quebrajano	NO	NO	NO	SI
ETAP de Jaén con 450 l/s de capacidad máxima	SI	SI	SI	SI
Mejora e incremento de la capacidad de transporte de la conducción embalse del Quebrajano-ETAP de Jaén	NO	SI	SI	SI
Sondeos La Merced (capacidad máxima de bombeo 200 l/s)	SI	SI	SI	SI
Sondeos el Santa Catalina, El Tomillo y Peñas de Castro	SI	SI	SI	SI
Elevaciones de Mingo	SI	SI	SI	SI
Manantial de Río Frio y canal de los Villares	SI	SI	SI	SI
Sondeos de Cerro la Cal y Fuente Higuera	SI	SI	SI	SI
Manantiales de Vadillo, Encina, Fuente del Río y Negra.	SI	SI	SI	SI
Caudales ambientales	SI	SI	SI	SI

Tabla 1. Principales elementos del sistema de recursos hídricos que intervienen en cada escenario de simulación  
 Table 1. Key elements of the hydric resources system taking part in every simulation scenario

de agua que participan en cada uno de los escenarios de simulación. Dicho coste se ha calculado mediante la aplicación de la expresión (2), ya que la tarifa en alta, para la fuente de agua  $i$  ( $i= 1...n$ ), es la misma en cualquier escenario de simulación  $j$ .

Cada una de las tarifas  $t_{ij}$  que se adjuntan en la Tabla 4 ha sido facilitada por las entidades que administran y gestionan cada una de las infraestructuras y fuentes de agua que se muestran en la misma. Aquellas son las siguientes: Confederación

SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO	FUENTES DE SUMINISTRO	
Mancomunidad del Quiebrajano	Embalse Quiebrajano	
	Sondeos La Merced	
	Elevaciones Mingo II y Mingo III	
Abastecimiento complementario a Jaén capital	Elevación Mingo I	
	Captación manantial de río Frio –	
	Sondeo Peñas de Castro	
	Sondeo Santa Catalina	
Comarca de Martos	Sondeo El Tomillo	
	Fuentes de Martos	Manantial Papel Baja
	Sondeos y captación de manantiales.	Sondeo y manantial de la Maleza
	Embalse del Víboras	
Sistemas de abastecimiento de índole municipal	Sondeos del Víboras	
	Los Villares	Captación manantial de río Frio –
	Alcaudete	Sondeo de cerro La Cal
	Valdepeñas de Jaén	Manantial de Vadillo
	Fuensanta de Martos	Manantial de Encinar, Fuente del río

Tabla 2. Fuentes de suministro del sistema de recursos hídricos Quiebrajano-Víboras  
 Table 2. Supply sources of the hydric resources system in Quiebrajano-Víboras

Hidrográfica del Guadalquivir, Diputación Provincial de Jaén, Empresas de gestión de aguas Aqualia (delegaciones de Jaén y Martos) e Hidrogestión (Alcaudete), y Ayuntamientos de los distintos municipios y pedanías que se abastecen desde el sistema de explotación Quiebrajano-Víboras. Dichas entidades aplican una tarifa única para cada una de las agrupaciones de fuentes de agua que se muestran en las tablas 4 y 5. Según las entidades consultadas no es posible desglosar dicha tarifa en fracciones más pequeñas.

En la tabla 5 se muestra, para cada uno de los escenarios de simulación que se han simulado, la garantía mensual  $G_m$ , la garantía volumétrica  $G_v$  y el máximo déficit mensual  $MDM_j$  para los abastecimientos de índole supramunicipal y municipal.

En la Tabla 6 se hace referencia al valor que toman las distintas variables que intervienen en los cálculos de los indicadores que se han definido en el apartado de metodología. En dicha Tabla  $G_{mj}$  y  $G_{vj}$  son la garantía mensual y volumétrica para el abastecimiento urbano del sistema de recursos hídricos Quiebrajano-Víboras en el escenario de simulación  $j$ . Dicho sistema de recursos hídricos se encuentra conformado por la Mancomunidad del Quiebrajano y la Comarca de Martos, por lo que las garantías  $G_{mj}$  y  $G_{vj}$  vendrán determinadas, como se puede ver por comparación de las Tablas 5 y 6, por la menor de las garantías con la que se satisface la demanda en uno cualquiera de

los dos sistemas de abastecimiento. En cambio, el máximo déficit mensual corresponderá al mayor valor de los obtenidos al sumar, para cada escenario de simulación  $j$ , el máximo déficit mensual de la Mancomunidad del Quiebrajano con el máximo déficit mensual de la Comarca de Martos.

En la tabla 7 se muestra el valor que toman los indicadores absolutos y relativos, que relacionan el coste unitario del agua con criterios garantes del recurso hídrico, y en la tabla 8 los escenarios de simulación donde dichos indicadores absolutos y relativos presentan un valor mínimo. A este respecto cabe indicar que el escenario denominado "VARIANTE IMPERMEABILIZACIÓN DEL EMBALSE DEL QUIEBRAJANO" no presenta ningún indicador con valor mínimo; los escenarios denominados "SITUACIÓN SIN CONEXIÓN" y "SITUACIÓN CON CONEXIÓN" tampoco; y es el escenario "VARIANTE SIN PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL EMBALSE DEL VÍBORAS" el que presenta valores mínimos en todos los indicadores.

Es importante destacar que el escenario denominado "VARIANTE SIN PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL EMBALSE DEL VÍBORAS" no presenta el mejor resultado ni para la garantía mensual (lo hace el escenario denominado VARIANTE IMPERMEABILIZACIÓN DEL EMBALSE DEL QUIEBRAJANO), ni para la garantía volumétrica (lo hace el escenario denominado SITUACIÓN CON

Agrupaciones de fuentes de suministro de agua que pueden participar en la satisfacción de la demanda de abastecimiento urbano del sistema de explotación Quiebrajano-Viboras	Volumen anual medio suministrado ( $VS_{i,j}$ ) por cada una de las agrupaciones de fuentes de agua que participan en cada uno de los escenarios de simulación que se han analizado en el sistema de explotación Quiebrajano-Viboras.			
	$VS_{i,1}$ ESCENARIO SITUACIÓN SIN CONEXIÓN hm <sup>3</sup> /a	$VS_{i,2}$ ESCENARIO SITUACIÓN CON CONEXIÓN hm <sup>3</sup> /a	$VS_{i,3}$ VARIANTE SIN PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL EMBALSE DEL VIBORAS hm <sup>3</sup> /a	$VS_{i,4}$ VARIANTE IMPERMEABILIZACIÓN DEL EMBALSE DEL QUIEBRAJANO hm <sup>3</sup> /a
Embalse Quiebrajano (i=1)	5,220	5,280	5,530	8,60
Sondeos de La Merced (i=2)	0,818	0,734	0,812	0,71
Elevaciones de los manantiales	8,530	9,060	8,690	5,45
Fuentes de Martos (i=4)	4,710	5,290	5,410	5,17
Captación manantial de río Frio – Canal de Los Villares (i=5)	2,500	2,380	2,430	2,15
Sondeos de abastecimiento a Jaén <sup>(1)</sup> (i=6)	0,431	0,246	0,295	0,38
Sondeos de abastecimiento a la Comarca de Martos y Sistemas de abastecimiento de indole municipal <sup>(2)</sup> (i=7)	1,207	0,833	0,886	0,87
Captación de manantiales para el abastecimiento a los núcleos de población de la cuenca del Viboras y Sistemas de abastecimiento de indole Embalse del Viboras(i=9)	2,187	2,177	2,147	2,10
Sondeos Gracia-Morenita (i=10)	0,000	1,620	0,000	1,69
$\sum VS_{i,j}$ Suministro total hm <sup>3</sup> /a	26,846	28,596	27,373	28,266

- (1) Bajo la terminología Sondeos de abastecimiento a Jaén se incluyen los siguientes sondeos: Sondeo Peñas de Castro, Sondeo Santa Catalina y Sondeo El Tomillo.
- (2) Bajo la terminología Sondeos de abastecimiento a la Comarca de Martos y Sistemas de abastecimiento de indole municipal se incluyen los siguientes sondeos y manantiales: Sondeos de Jabalcuz, Sondeo y manantial de la Maleza, Sondeo Cuesta Negra, Sondeo Santa Ana, Sondeo Loma Pineda, Sondeo de Cerro La Cal y Sondeo de regulación del manantial de Fuente la Higuera.
- (3) Bajo la terminología captación de manantiales para el abastecimiento a los núcleos de población de la cuenca del Viboras y Sistemas de abastecimiento de indole municipal se incluyen los siguientes manantiales: Manantial Papel Baja, Manantial Papel Alta, Manantial Valdepeñas, Manantial Chircales, Manantial de Vadillo, Fuente del río y Fuente Negra.

Tabla 3. Volumen anual medio suministrado por cada una de las agrupaciones de fuentes de agua que participan en cada uno de los escenarios de simulación que se han analizado en el sistema de explotación Quiebrajano-Viboras. Resultados obtenidos mediante la aplicación del código SIMGES

Table 3. Average annual volume provided by each of the water source associations taking part in the simulation scenarios which have been analysed in the Quiebrajano-Viboras exploitation system. Results provided through the SIMGES code

CONEXIÓN), ni para el mínimo MÁXIMO DÉFICIT MENSUAL (lo hace el escenario denominado VARIANTE IMPERMEABILIZACIÓN DEL EMBALSE DEL QUIEBRAJANO). Por el contrario, presenta el mínimo coste unitario del agua.

De la observación de las tablas 3, 4 y 5 se deduce que los escenarios con un mayor número de infraestructuras de tipo superficial presentan los mejores

valores de garantía y MDM, pero el coste que esto conlleva no parece justificar los resultados que se obtienen. Por otro lado se tiene que el escenario que muestra un menor coste unitario del agua presenta a su vez un valor no admisible de la garantía mensual con que se satisface el abastecimiento de la Comarca de Martos. El escenario "VARIANTE SIN PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL EMBALSE DEL VÍBORAS",

Agrupaciones de fuentes de suministro de agua que pueden participar en la satisfacción de la demanda de abastecimiento urbano del sistema de explotación Quiebrajano-Viboras	$t_{ij}$ Tarifas en alta (€/m <sup>3</sup> )	Coste del agua ( $\sum VS_{ij} \cdot t_{ij}$ ) suministrada por cada una de las agrupaciones de fuentes de agua que participan en cada uno de los escenarios de simulación que se han analizado en el sistema de explotación Quiebrajano-Viboras.			
		$VS_{i1} \cdot t_{i1}$ SITUACIÓN SIN CONEXIÓN (millones €/a)	$VS_{i2} \cdot t_{i2}$ SITUACIÓN CON CONEXIÓN (millones €/a)	$VS_{i3} \cdot t_{i3}$ VARIANTE SIN PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL EMBALSE DEL VÍBORAS (millones €/a)	$VS_{i4} \cdot t_{i4}$ VARIANTE IMPERMEABILIZACIÓN DEL EMBALSE DEL QUIEBRAJANO (millones €/a)
Embalse Quiebrajano (i=1)	0,105	0,548	0,554	0,581	0,903
Sondeos de La Merced (i=2)	0,108	0,088	0,079	0,088	0,077
Elevaciones de los manantiales de Mingo (i=3)	0,042	0,358	0,381	0,365	0,229
Fuentes de Martos (i=4)	0,108	0,509	0,571	0,584	0,558
Captación manantial de río Frio – Canal de Los Villares (i=5)	0,045	0,113	0,107	0,109	0,097
Sondeos de abastecimiento a Jaén <sup>(4)</sup> (i=6)	0,090	0,039	0,022	0,027	0,034
Sondeos de abastecimiento a la Comarca de Martos y Sistemas de abastecimiento de índole municipal <sup>(5)</sup> (i=7)	0,080	0,097	0,067	0,071	0,069
Captación de manantiales para el abastecimiento a los núcleos de población de la cuenca del Viboras y Sistemas de abastecimiento de índole municipal <sup>(6)</sup> (i=8)	0,025	0,055	0,054	0,054	0,052
Embalse del Viboras (i=9)	0,340 <sup>(a)</sup>	0,000	0,551	0,000	0,575
Sondeos Gracia-Morenita (i=10)	0,212 <sup>(b)</sup>	0,263	0,207	0,248	0,244
$C_j = \sum VS_{ij} \cdot t_{ij}$ (millones €/a)		2,069	2,594	2,127	2,838
$C_j = \frac{\sum VS_{ij} \cdot t_{ij}}{\sum VS_{ij}}$ Coste unitario -C- (€/m <sup>3</sup> )		0,077	0,091	0,078	0,100

- (4) Bajo la terminología sondeos de abastecimiento a Jaén se incluyen los siguientes sondeos: Sondeo Peñas de Castro, Sondeo Santa Catalina y Sondeo El Tomillo.
- (5) Bajo la terminología sondeos de abastecimiento a la Comarca de Martos y Sistemas de abastecimiento de índole municipal se incluyen los siguientes sondeos y manantiales: Sondeos de Jabalcuz, Sondeo y Manantial de la Maleza, Sondeo Cuesta Negra, Sondeo Santa Ana y Sondeo Loma Pineda.
- (6) Bajo la terminología captación de manantiales para el abastecimiento a los núcleos de población de la cuenca del Viboras y Sistemas de abastecimiento de índole municipal se incluyen los siguientes manantiales: Manantial Papel Baja, Manantial Papel Alta, Manantial Valdepeñas, Manantial Chircales, Manantial de Vadillo, Fuente del río y Fuente Negra.
- (a) Incluye el coste de potabilización que es de 0,15 €/m<sup>3</sup>, ya que contempla desalación por ósmosis inversa. Los costes de amortización de las infraestructuras de elevación, conducción y regulación que se han estimado en 0,10 €/m<sup>3</sup>, los de mantenimiento y operación de dichas infraestructuras que se evalúan en 0,05 €/m<sup>3</sup> y los energéticos, excluyendo los de potabilización, que se han cuantificado en 0,04 €/m<sup>3</sup>.
- (b) Incluye la operación de recarga artificial del acuífero de Gracia-Morenita que genera un coste adicional de 0,012 €/m<sup>3</sup> (Rubio, 2002 y Gonzalez Ramón et al, 2002). Este coste unitario adicional parece algo bajo para los autores del presente artículo.

Tabla 4. Coste del agua suministrada por cada una de las agrupaciones de fuentes de agua que participan en cada uno de los escenarios de simulación que se han analizado en el sistema de explotación Quiebrajano-Viboras

Table 4. Cost of water provided by each of the water source associations taking part in the simulation scenarios which have been analysed in the Quiebrajano-Viboras exploitation system

Garantía Mensual, Volumétrica y Máximo Déficit Mensual para los sistemas de abastecimiento de tipo supramunicipal		Escenarios de Simulación			
		SITUACIÓN SIN CONEXIÓN	SITUACIÓN CON CONEXIÓN	VARIANTE SIN PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL EMBALSE DEL VÍBORAS	VARIANTE IMPERMEABILIZACIÓN DEL EMBALSE DEL QUIEBRAJANO
GARANTÍA MENSUAL $G_v$	Mancomunidad del Quebrajano	87,30%	89,40%	86,80%	90,20%
	Comarca de Martos	36,40%	89,40%	86,30%	90,00%
GARANTÍA VOLUMÉTRICA $G_v$	Mancomunidad del Quebrajano	95,30%	99,40%	98,70%	99,50%
	Comarca de Martos	91,10%	97,00%	94,70%	92,10%
MÁXIMO DÉFICIT MENSUAL ( $hm^3$ ) $MDM_j$	Mancomunidad del Quebrajano	0,923	0,352	0,417	0,312
	Comarca de Martos	0,326	0,361	0,433	0,372

Tabla 5. Garantía Mensual, Volumétrica y Máximo Déficit Mensual para la Mancomunidad del Quebrajano y la Comarca de Martos en cada uno de los escenarios de simulación que se han analizado en el sistema de recursos hídricos Quebrajano-Víboras. Resultados obtenidos mediante la aplicación del código SIMGES

Table 5. Monthly and Volumetric Guarantee, and Maximum Monthly Deficit in the Quebrajano joint association and Martos region for every simulation scenario analysed in the Quebrajano-Víboras hydric resources system. Results provided through the SIMGES code

Variables que intervienen en los cálculos de los indicadores	Escenarios de Simulación			
	SITUACIÓN SIN CONEXIÓN	SITUACIÓN CON CONEXIÓN	VARIANTE SIN PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL EMBALSE DEL VÍBORAS	VARIANTE IMPERMEABILIZACIÓN DEL EMBALSE DEL QUIEBRAJANO
$G_v$ (%)	36,40	89,40	86,30	90,00
$G_v$ (%)	91,10	97,00	94,70	92,10
$MDM_j$ ( $hm^3$ )	1,249	0,713	0,850	0,684
$C_j$ ( $€/m^3$ )	0,056	0,069	0,055	0,079
$C_{mín}$ ( $€/m^3$ )			0,055	
$G_{m,már}$ (%)			90,00	
$G_{v,már}$ (%)			97,00	
$MDM_{mín}$ ( $hm^3$ )			0,684	

Tabla 6. Valores que toman las distintas variables que intervienen en los cálculos de los indicadores que se han definido en el apartado de metodología

Table 6. Values taken by the different variables taking part in the calculations of indicators defined in the methodology section

Indicador	Escenarios de Simulación			
	SITUACIÓN SIN CONEXIÓN	SITUACIÓN CON CONEXIÓN	VARIANTE SIN PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL EMBALSE DEL VÍBORAS	VARIANTE IMPERMEABILIZACIÓN DEL EMBALSE DEL QUIEBRAJANO
$c_{m_j}$	0,154	0,077	0,064	0,088
$c_{v_j}$	0,061	0,071	0,058	0,086
$c_{d_j}$	0,070	0,049	0,047	0,054
$cg_{m_j}$	2,517	1,263	1,043	1,436
$cg_{v_j}$	1,084	1,255	1,024	1,513
$cg_{d_j}$	1,859	1,308	1,243	1,436
$cg_j$	<b>1,718</b>	<b>1,275</b>	<b>1,099</b>	<b>1,461</b>

Tabla 7. Valores que toman los indicadores absolutos y relativos, que relacionan el coste unitario del agua con criterios garantes del recurso hídrico, para los distintos escenarios de simulación que se han analizado en el sistema de explotación Quiebrajano-Víboras  
 Table 7. Values taken by absolute and relative indicators, which relate the cost per water unit to the criteria guaranteeing hydric resources, in the different simulation scenarios analysed in the Quiebrajano-Víboras exploitation system

Indicador	Escenarios de Simulación			
	SITUACIÓN SIN CONEXIÓN	SITUACIÓN CON CONEXIÓN	VARIANTE SIN PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL EMBALSE DEL VÍBORAS	VARIANTE IMPERMEABILIZACIÓN DEL EMBALSE DEL QUIEBRAJANO
$c_{m_j}$			Mínimo	
$c_{v_j}$			Mínimo	
$c_{d_j}$			Mínimo	
$cg_{m_j}$			Mínimo	
$cg_{v_j}$			Mínimo	
$cg_{d_j}$			Mínimo	
$cg_j$			Mínimo	

Tabla 8. Escenarios de simulación con valor mínimo de los indicadores absolutos y relativos definido en el apartado de metodología  
 Table 8. Simulation scenarios with absolute and relative indicators minimum value defined in the methodology section

permite por un lado un menor coste, pues se sustituye una obra que conlleva una fuerte inversión, como es el embalse del Víboras, por agua subterránea procedente del acuífero de Gracia-Morenita, que confiere al sistema una mayor estabilidad, pues ésta, si se compara con la aportación superficial, no está tan condicionada por una variable tan estocástica, como

es la precipitación directa sobre la superficie del terreno. Asimismo se reemplaza un agua, que precisa de una operación de potabilización con ósmosis inversa, por otra de una excelente calidad, que sólo necesita de un mínimo tratamiento de cloración.

El análisis realizado hasta el momento se ha efectuado sin tener en cuenta la garantía con la que se

Área geográfica	Garantía Mensual y Volumétrica del caudal ambiental	Escenarios de Simulación			
		SITUACIÓN SIN CONEXIÓN	SITUACIÓN CON CONEXIÓN	VARIANTE SIN PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL EMBALSE DEL VÍBORAS	VARIANTE IMPERMEABILIZACIÓN DEL EMBALSE DEL QUIEBRAJANO
Sistema Quebrajano-Víboras exceptuando la cuenca del río Víboras localizada aguas arriba del embalse del mismo nombre	Garantía Mensual	87,40 %	83,20 %	83,00 %	83,00 %
	Garantía Volumétrica	97,80 %	97,40 %	97,10 %	97,20 %
Cuenca del río Víboras situada aguas arriba del embalse del mismo nombre	Garantía Mensual	88,60 %	83,20 %	66,30 %	83,00 %
	Garantía Volumétrica	97,50 %	96,00 %	89,10 %	95,90 %

Tabla 9. Garantía Mensual y Volumétrica del caudal ambiental que debería de circular por el sistema de recursos hídricos Quebrajano-Víboras. Resultados obtenidos mediante la aplicación del código SIMGES

Table 9. Monthly and Volumetric Guarantee of the environmental flow that should flow through the hydric resources system in Quebrajano-Víboras. Results provided through the SIMGES code

Máximo Déficit Mensual MDM (hm <sub>3</sub> ) del caudal ambiental	Escenarios de Simulación			
	SITUACIÓN SIN CONEXIÓN	SITUACIÓN CON CONEXIÓN	VARIANTE SIN PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL EMBALSE DEL VÍBORAS	VARIANTE IMPERMEABILIZACIÓN DEL EMBALSE DEL QUIEBRAJANO
Sistema Quebrajano-Víboras (1)	1,796	1,869	2,033	1,984
Río Víboras aguas arriba del embalse del mismo nombre (2)	1,056	1,162	1,449	1,172
Resto del sistema (1) - (2)=(3)	0,740	0,707	0,584	0,812
Máximo déficit mensual en el río Víboras aguas arriba del embalse del mismo nombre (2) con respecto al total del sistema Quebrajano-Víboras (1)	58,80 %	62,17 %	71,27 %	59,07 %

Tabla 10. Máximo Déficit Mensual del caudal ambiental que debería de circular por diferentes zonas del sistema de recursos hídricos Quebrajano-Víboras. Resultados obtenidos mediante la aplicación del código SIMGES

Table 10. Maximum Monthly Deficit of the environmental flow that should flow through different areas of the Quebrajano-Víboras hydric resources system. Results provided through the SIMGES code

satisface el caudal ambiental. A este respecto en la tabla 9 se muestran los valores de la garantía mensual y volumétrica de los caudales ambientales que han de circular tanto por la cuenca del río Víboras situada aguas arriba del embalse del mismo nombre, como por el resto de cuencas que conforman el sistema de recursos hídricos del Quebrajano-Víboras. En dicha tabla se observa que la garantía mensual y volumétrica del caudal ambiental se puede catalogar de aceptable, salvo en la cuenca del río Víboras, situada aguas arriba del embalse del mismo nombre, donde para el escenario de simulación que se ha denominado "VARIANTE SIN PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL EMBALSE DEL VÍBORAS" la garantía mensual presenta un valor de 66,3%. Dicho escenario de simulación también presenta el valor más bajo de garantía mensual y volumétrica de todos los escenarios que se han analizado.

El Máximo Déficit Mensual es especialmente significativo en la Cuenca del río Víboras situada aguas arriba del embalse del mismo nombre, para cualquiera de los escenarios simulados, ya que en dicha zona siempre se concentra un porcentaje de déficit que es superior al cincuenta por ciento. Esta situación es particularmente comprometida, puesto que se alcanza UN déficit del 71,27%, en el escenario que se ha denominado "VARIANTE SIN PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL EMBALSE DEL VÍBORAS".

Ante los resultados que se muestran en la Tabla 9 se plantea la posibilidad de proponer algún tipo de actuación que mejore la garantía ambiental y el Máximo Déficit Mensual del escenario de simulación denominado "VARIANTE SIN PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL EMBALSE DEL VÍBORAS", puesto dicho escenario presentaba los mejores resultados cuando sólo se evaluó la demanda para abastecimiento urbano.

Dicho tipo de actuación consistiría en bombear agua en uno de los acuíferos no explotados de la cabecera del Víboras, exclusivamente durante los periodos en los que se producen fallos en el caudal ambiental, para verter una parte de la misma en el cauce del río, mientras que la otra se destinaría a satisfacer usos consuntivos. La parte que se vierte en el cauce puede ser aprovechada aguas abajo del punto donde se precisa incrementar la garantía del caudal ambiental.

En la Tabla 11 se muestra el resultado de un escenario de simulación que contempla esta forma de actuar, así como una comparativa con los escenarios de simulación que se plantean en la Tabla 4. En las Tablas 11 y 12 se aprecia y pone de manifiesto que, mediante la realización de un bombeo en el acuífero de Cornicabra-Noguerones de 0,593 hm<sup>3</sup>/a en aque-

llos periodos en que esto sea preciso, se obtiene una garantía mensual para el caudal ambiental del 96,6% y una garantía volumétrica del 99,1%.

Los resultados que se obtienen en las Tablas 11, 12 y 13 para el escenario de simulación "VARIANTE SIN PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL EMBALSE DEL VÍBORAS, PERO CONTEMPLANDO BOMBEO AMBIENTALES" son notablemente mejores que los alcanzados en los escenarios planteados en la Tabla 4.

El bombeo ambiental de tipo adicional y esporádico, que se contempla en dicho escenario, únicamente supondría un incremento en el coste del agua de 0,012 (€/m<sup>3</sup>) sobre el denominado "VARIANTE SIN PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL EMBALSE DEL VÍBORAS", que no contempla bombeo ambiental. Dicho coste es dos décima de céntimo de Euro y doce céntimos de Euro más barato que los obtenidos para los escenarios denominados "SITUACIÓN CON CONEXIÓN" y "VARIANTE IMPERMEABILIZACIÓN DEL EMBALSE DEL QUIEBRAJANO", que son dos escenarios donde una parte importante de la demanda se satisface con recursos del recientemente construido embalse del Víboras. Estos dos últimos escenarios ponen en juego una menor cantidad de agua que la aportada por el escenario "VARIANTE SIN PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL EMBALSE DEL VÍBORAS, PERO CONTEMPLANDO BOMBEO AMBIENTALES", que se cifra en 0,118 hm<sup>3</sup>/a y 0,448 hm<sup>3</sup>/a respectivamente. Estos decrementos serían de 0,711 hm<sup>3</sup>/a y 1,041 hm<sup>3</sup>/a en el caso de considerar junto a los usos consuntivos los caudales ambientales.

En la tabla 13 se comprueba que por medio de la actuación propuesta (complementar el caudal ambiental mediante bombeo adicional) el Máximo Déficit Mensual en el caudal ambiental del río Víboras, aguas arriba del embalse del mismo nombre, disminuye tanto en valor absoluto como en valor relativo, puesto que pasa de 1,449 hm<sup>3</sup>/a a 0,783 hm<sup>3</sup>/a y de una concentración del déficit del 71,27 % a otra del 52,59 %. Si se comparan estos valores con los obtenidos en el resto de los escenarios planteados también representan el mejor resultado posible.

Una vez descartados los escenarios "SITUACIÓN SIN CONEXIÓN" y "VARIANTE SIN PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL EMBALSE DEL VÍBORAS". El primero porque la garantía de abastecimiento para la Comarca de Martos es excesivamente baja (Tabla 5) y el segundo porque la garantía ambiental para río Víboras aguas arriba del embalse del mismo nombre no es aceptable (Tabla 9), se ha elaborado la Tabla 14, donde se presentan los nuevos valores que adquieren los indicadores absolutos y relativos. A este respecto cabe indicar que la mejor situación posible es la correspondiente al escenario "VARIANTE SIN PUES-

Agrupaciones de fuentes de suministro de agua que pueden participar en la satisfacción de la demanda de abastecimiento urbano del sistema de explotación Quebrajano-Víboras	$t_j$ Tarifas en alta (€/m <sup>3</sup> )	Volumen anual medio suministrado ( $VS_j$ ) por cada una de las agrupaciones de fuentes de agua que participan en cada uno de los escenarios de simulación que se han analizado en el sistema de explotación Quebrajano-Víboras				
		$VS_{.1}$ SITUACIÓN SIN CONEXIÓN hm <sup>3</sup> /a	$VS_{.2}$ SITUACIÓN CON CONEXIÓN hm <sup>3</sup> /a	$VS_{.3}$ VARIANTE SIN PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL EMBALSE DEL VÍBORAS hm <sup>3</sup> /a	$VS_{.4}$ VARIANTE IMPERMEABILIZACIÓN DEL EMBALSE DEL QUEBRAJANO hm <sup>3</sup> /a	$VS_{.5}$ VARIANTE SIN PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL EMBALSE DEL VÍBORAS, PERO CONTEMPLANDO BOMBEO AMBIENTALES hm <sup>3</sup> /a
Embalse Quebrajano (j=1)	0,105	5,220	5,280	5,530	8,600	5,290
Sondeos de La Merced (j=2)	0,108	0,818	0,734	0,812	0,710	0,733
Elevaciones de los manantiales de Mingo(j=3)	0,042	8,530	9,060	8,690	5,450	9,080
Fuentes de Martos(j=4)	0,108	4,710	5,290	5,410	5,170	5,210
Captación manantial de río Frio – Canal de Los Villares(j=5)	0,045	2,500	2,380	2,430	2,150	2,390
Sondeos de abastecimiento a Jaén(j=6) <sup>(1)</sup>	0,090	0,431	0,246	0,295	0,383	0,249
Sondeos de abastecimiento a la Comarca de Martos y Sistemas de abastecimiento de índole municipal (j=7) <sup>(1)</sup>	0,080	1,207	0,833	0,886	0,867	0,833
Captación de manantiales para el abastecimiento a los núcleos de población de la cuenca del Víboras y Sistemas de abastecimiento de índole municipal (j=8) <sup>(1)</sup>	0,025	2,187	2,177	2,147	2,097	2,167
Embalse del Víboras(j=9)	0,340	0,000	1,620	0,000	1,690	1,630
Sondeos Gracia-Moreña (j=10)	0,212	1,243	0,977	1,172	1,150	1,132
Bombeo en el acuífero Comicabra-Noguerones para complementar el caudal ambiental de los ríos (j=11)	0,110	0,000	0,000	0,000	0,000	0,593
Volumen de agua destinado a satisfacer usos consuntivos y no consuntivos (hm <sup>3</sup> /a) $\sum_{j=1}^{11} VS_j$		26,846	28,596	27,373	28,266	29,307
Volumen de agua $\sum_{j=1}^{10} VS_j$		26,846	28,596	27,373	28,266	28,714
Coste unitario (€/m <sup>3</sup> ) $C_j = \frac{\sum_{j=1}^{11} VS_j \cdot t_j}{\sum_{j=1}^{11} VS_j}$		0,077	0,091	0,078	0,100	0,090

*Se incluye con respecto a las tablas 3 y 4 un escenario adicional que contempla el bombeo de agua desde los acuíferos para complementar el caudal ambiental de los ríos ( $VS_{.5}$ )*

Tabla 11. Coste unitario del agua suministrada por cada uno los escenarios de simulación que se han analizado en el sistema de explotación Quebrajano-Víboras y volumen anual medio suministrado por cada una de las fuentes de agua que participan en dichos escenarios. Resultados obtenidos mediante la aplicación del código SIMGES

Table 11. Cost per water unit provided by every simulation scenario analysed in the explotaiton system in Quebrajano-Víboras and average annual volume provided by every water source taking part in these scenarios. Results provided through the SIMGES code

Uso	Garantía Mensual, Volumétrica y Máximo Déficit Mensual	Escenarios de Simulación				
		SITUACIÓN SIN CONEXIÓN	SITUACIÓN CON CONEXIÓN	VARIANTE SIN PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL EMBALSE DEL VÍBORAS	VARIANTE IMPERMEABILIZACIÓN DEL EMBALSE DEL QUIEBRAJANO	VARIANTE SIN PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL EMBALSE DEL VÍBORAS, PERO CONTEMPLANDO BOMBEO AMBIENTALES
ABASTECIMIENTO URBANO SISTEMA QUIEBRAJANO-VÍBORAS	GARANTÍA MENSUAL $G_m$	36,4%	89,4%	86,3%	90,0%	89,5%
	GARANTÍA VOLUMÉTRICA $G_v$	91,1%	97,0%	94,7%	92,1%	97,0%
	MÁXIMO DÉFICIT MENSUAL $MDM_j$ (hm <sup>3</sup> )	1,249	0,713	0,850	0,684	0,724
CAUDAL AMBIENTAL RÍO VÍBORAS AGUAS ARRIBA DEL EMBALSE DEL MISMO NOMBRE <sup>(1)</sup>	GARANTÍA MENSUAL $G_m$	88,6%	83,2%	66,3%	83,0%	96,6%
	GARANTÍA VOLUMÉTRICA $G_v$	97,5%	96,0%	89,1%	95,9%	99,1%
	MÁXIMO DÉFICIT MENSUAL $MDM_j$ (hm <sup>3</sup> )	1,056	1,162	1,449	1,172	0,783
CAUDAL AMBIENTAL RESTO DEL SISTEMA <sup>(2)</sup>	GARANTÍA MENSUAL $G_m$	87,4%	83,2%	83,0%	83,0%	89,7%
	GARANTÍA VOLUMÉTRICA $G_v$	97,8%	97,4%	97,1%	97,2%	98,7%
	MÁXIMO DÉFICIT MENSUAL $MDM_j$ (hm <sup>3</sup> )	0,740	0,707	0,584	0,812	0,706

<sup>(1)</sup> Sólo contempla el río Víboras aguas arriba del embalse del mismo nombre.  
<sup>(2)</sup> Contempla todo el Sistema Quebrajano-Víboras con excepción de la cuenca del río Víboras que se localiza aguas arriba del embalse del mismo nombre.

Tabla 12. Garantía Mensual, Volumétrica y Máximo Déficit Mensual del abastecimiento y caudal ambiental en el sistema de recursos hídricos Quebrajano-Víboras. Resultados obtenidos mediante la aplicación del código SIMGES

Table 12. Monthly and Volumetric Guarantee, and Maximum Monthly Deficit of the supply and environmental flow in the Quebrajano-Víboras hydric resources system. Results provided through the SIMGES code

TA EN FUNCIONAMIENTO DEL EMBALSE DEL VÍBORAS, PERO CONTEMPLANDO BOMBEO AMBIENTALES”, ya que es el escenario que presenta un mayor número de indicadores absolutos y relativos con valor mínimo (Tabla 14).

### Conclusiones

En el presente artículo se han establecido, definido y aplicado una serie de indicadores que relacionan el coste unitario del agua con criterios garantes del

recurso hídrico. Estos indicadores se han ensayado sobre el sistema de recursos hídricos del Quebrajano-Víboras, que se localiza en la provincia española de Jaén.

Dicho sistema se encuentra constituido por diez agrupaciones de fuentes de agua, tanto de origen superficial como subterráneo, que han de satisfacer la demanda de dos grandes sistemas de abastecimiento. El funcionamiento del sistema se ha analizado sobre un modelo de uso conjunto construido con el código SIMGES, y sobre la alternativa de considerar dos escenarios de simulación.

Máximo Déficit Mensual MDM (hm <sup>3</sup> ) del caudal ambiental	Escenarios de Simulación				
	SITUACIÓN SIN CONEXIÓN	SITUACIÓN CON CONEXIÓN	VARIANTE SIN PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL EMBALSE DEL VÍBORAS	VARIANTE IMPERMEABILIZACIÓN DEL EMBALSE DEL QUIEBRAJANO	VARIANTE SIN PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL EMBALSE DEL VÍBORAS, PERO CONTEMPLANDO BOMBEO AMBIENTALES
Sistema Quebrajano-Víboras (1)	1,796	1,869	2,033	1,984	1,489
Río Víboras aguas arriba del embalse del mismo nombre (2)	1,056	1,162	1,449	1,172	0,783
Resto del sistema (1) - (2) = (3)	0,740	0,707	0,584	0,812	0,706
Máximo déficit mensual en el río Víboras aguas arriba del embalse del mismo nombre (2) con respecto al total del sistema Quebrajano-Víboras (1)	58,80%	62,17%	71,27%	59,07%	52,59%

Tabla 13. Máximo Déficit Mensual del caudal ambiental que debería de circular por diferentes zonas del sistema de recursos hídricos Quebrajano-Víboras. Resultados obtenidos mediante la aplicación del código SIMGES. Resultados obtenidos mediante la aplicación del código SIMGES

Table 13. Maximum Monthly Deficit of the environmental flow that should flow through different areas of the Quebrajano-Víboras hydric resources system. Results provided through the SIMGES code

En el primero se baraja la hipótesis de que ambos sistemas de abastecimiento funcionan independientemente el uno del otro, mientras que en el segundo dichos sistemas de abastecimiento se conectan mediante un canal reversible y se dotan de un mayor número de infraestructuras de almacenamiento, distribución y potabilización. Sobre este segundo escenario se contemplan dos variantes. Una primera donde las nuevas obras de almacenamiento de agua superficial (embalse del Víboras) no se utilizan y se sustituyen por el bombeo de agua subterránea, y una segunda donde se procede a impermeabilizar el embalse del Quebrajano para mejorar la regulación del mismo.

Los resultados que se obtienen, para los distintos escenarios y variantes que se han simulado, muestran que la utilización de indicadores, que relacionan el coste unitario del agua con criterios garantes del recurso hídrico, ofrecen como mejor solución la correspondiente a la hipótesis de interconexión entre los dos sistemas de abastecimiento, pero sin hacer uso del agua regulada en el embalse del Víboras, aunque sí del agua bombeada en los sondeos del Víboras, ya que dicho escenario presenta cinco indicadores con valor mínimo, sobre un máximo de siete posibles, aunque nunca proporciona el mejor resulta-

do parcial, tanto si éste se refiere a los índices garantes (máxima garantía mensual y volumétrica, y mínimo MÁXIMO DÉFICIT MENSUAL), como al mínimo coste unitario del agua.

Con la anterior hipótesis se consigue un coste unitario del agua (0,078 €/m<sup>3</sup>) similar al escenario sin conexión (0,077 €/m<sup>3</sup>), pero con unos índices de garantía más satisfactorios (86,30% por 36,40% para la garantía mensual, 94,70% por 91,10% para la garantía volumétrica y 0,850 hm<sup>3</sup> por 1,249 hm<sup>3</sup> para el Máximo Déficit Mensual). Las variantes que utilizan el embalse del Víboras, con o sin impermeabilización del embalse del Quebrajano, ofrecen mejores resultados garantes, que la hipótesis anterior (90,00% y 89,40% para la garantía mensual, 92,10% y 97,00% para la garantía volumétrica y 0,684 hm<sup>3</sup> y 0,713 hm<sup>3</sup> para el Máximo Déficit Mensual), pero también un mayor coste unitario del agua (0,100 €/m<sup>3</sup> y 0,091 €/m<sup>3</sup>), ya que es preciso crear una infraestructura superficial más compleja.

Sin embargo, cuando se analizan los índices garantes (garantía mensual, garantía volumétrica, y MÁXIMO DÉFICIT MENSUAL) del caudal ambiental, la hipótesis que no utiliza el embalse del Víboras deja de ser la mejor, ya que contempla una serie actuaciones (bombeo en el acuífero de Gracia-Morenita e

VARIABLES QUE INTERVIENEN EN LOS CÁLCULOS DE LOS INDICADORES	Escenarios de Simulación		
	SITUACIÓN CON CONEXIÓN	VARIANTE IMPERMEABILIZACIÓN DEL EMBALSE DEL QUIEBRAJANO	VARIANTE SIN PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL EMBALSE DEL VÍBORAS, PERO CONTEMPLANDO BOMBEO AMBIENTALES
$G_m$ (%)	89,40%	90,00%	89,70%
$G_v$ (%)	97,00%	92,10%	98,70%
$MDM_j$ (hm <sup>3</sup> )	0,713	0,684	0,724
$C_j$ (€/m <sup>3</sup> )	0,069	0,079	0,067
$C_{mín}$ (€/m <sup>3</sup> )	0,067		
$G_{m,mix}$ (%)	90,00%		
$G_{v,mix}$ (%)	98,70%		
$MDM_{mín}$ (hm <sup>3</sup> )	0,684		
INDICADORES			
$c_{m_j}$	0,077	0,088	0,075 (Mínimo)
$c_{v_j}$	0,071	0,086	0,068 (Mínimo)
$c_{d_j}$	0,086	0,054	0,049 (Mínimo)
$cg_{m_j}$	1,037	1,179	1,003 (Mínimo)
$cg_{v_j}$	1,048	1,264	1,000 (Mínimo)
$cg_{d_j}$	1,074	1,179	1,058 (Mínimo)
$cg_j$	1,053	1,207	1,020 (Mínimo)

Tabla 14. Valores que toman los indicadores absolutos y relativos, que relacionan el coste unitario del agua con criterios garantías del recurso hídrico, para los distintos escenarios de simulación que se han analizado en el sistema de explotación Quiebrajano-Víboras, una vez que se han eliminado aquellos escenarios que presentan una garantía consuntiva y ambiental no aceptable

*Table 14. Values taken by absolute and relative indicators, which relate the cost per water unit to the criteria guaranteeing hydric resources, in the different simulation scenarios analysed in the Quiebrajano-Víboras exploitation system, once the scenarios presenting a non-acceptable consumptive and environmental guarantee have been removed*

incremento del caudal captado en los manantiales que drenan a los acuíferos de cabecera), que provocan una detracción en el agua que circula por el río Víboras, aguas arriba del embalse del mismo nombre, que se traduce en una disminución de la garantía mensual y volumétrica del caudal ambiental, especialmente de la primera, que se reduce en un 16,90%, mientras que la segunda lo hace en un 6,90%.

Para solventar el efecto negativo, que causa dicha afección, se puede proceder a bombear en uno de los

acuíferos (Cornicabra-Noguerones) no explotados de la cabecera del río Víboras, exclusivamente durante los periodos en los que se producen fallos en el caudal ambiental, y verter una parte del caudal bombeado en el cauce del río, mientras que la otra se destina a satisfacer usos consuntivos. Esta operación incrementaría la garantía mensual del caudal ambiental, que debe circular por el río Víboras aguas arriba del embalse del mismo nombre, en un 30,3% y la volumétrica en 10%. Económicamente esta operación

supondría un incremento en el coste del agua de 0,012 (€/m<sup>3</sup>) sobre el precio calculado para la variante en que no se contempla bombeo ambiental. Dicho coste es una décima de céntimo de Euro y diez céntimos de Euro más barato que el obtenido en los escenarios que contemplan una mayor cantidad de infraestructura superficial.

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede concretar que no hubiera hecho falta construir el embalse de Víboras, pues existen otras alternativas, fundamentadas en el uso de las aguas subterráneas, que proporcionan un mejor resultado tanto bajo un punto de vista técnico, como económico y medioambiental.

## Agradecimientos

El presente artículo deviene de una serie de colaboraciones que el IGME mantiene con la Agencia Andaluza del Agua. Los trabajos sintetizados en el mismo han sido posibles gracias a la colaboración de diferentes organismos públicos y empresas de carácter privado y estatal. En particular se agradece la especial colaboración mostrada por la Delegación de Medio Ambiente de Jaén (en la persona de Inmaculada Ortuño); la Delegación en Jaén de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (en la persona de Juan de Dios Gallego); la Diputación Provincial de Jaén (en las personas de Juan de Dios Olite y Miguel Rosales); la Sociedad Estatal AQUAVIR (en la persona de Antonio Sandoval); las empresas Aqualia (Jaén y Martos) e HidroGestión (Alcaudete); los Ayuntamientos de Los Villares, Valdepeñas de Jaén y Fuensanta de Martos; el equipo técnico de la Oficina de Proyectos del IGME en Granada; la ETSI de Montes de Madrid (especialmente Domingo Baeza), que aplico la metodología IFIM al cálculo de los caudales ecológicos; la ETSI de Caminos de Valencia (en las personas de Abel Solera y Andrés Sahuquillo por su constante asesoramiento); María Estirado e Isabel Clara Rodríguez de la Agencia Andaluza del Agua, codirectoras del proyecto; y muy especialmente a Juan López Martos y Juan Antonio López Geta promotores e impulsores de la idea.

## Referencias

ACRES 1998. User's Manual ARSP Acres Reservoir Simulation Package. *ACRES International Ltd.*  
Alexandre, N. R. y Porto, R. L. 2000. O sistema ModSimLS: um modelo de rede de fluxo para simulação de bacias hidrográficas". *Journal of Water Resources Planning and Management*, 126 (2), 85-97.

Andreu, J. y Capilla, J. 1993. El modelo de gestión de cuencas SIMGES. En Andreu, J. (ed) "Conceptos y métodos para la planificación hidrológica" CIMNE. Barcelona, pp. 298-321.  
Andreu, J., Capilla, J. y Sanchis, E. 1996. AQUATOOL, a generalized Decision Support System for water-resources planning and management. *Journal of Hydrology*, 177, 269-291.  
Andreu, J., M. Pulido-Velázquez, G. Collazos y M.A. Pérez. 2004. Metodología y herramientas para el análisis económico de sistemas de recursos hídricos. Aplicación a la Directiva Marco Europea del Agua. IV Congreso Ibérico de Gestión y Planificación del Agua. Tortosa (España). Versión en CD-Rom.  
Baeza Sanz, D. y Vizcaíno Martínez, P. 2008. Estimación de caudales ecológicos en dos cuencas de Andalucía. Uso Conjunto de aguas superficiales y subterráneas. *Ecosistemas*, 17 (1). <http://www.revistaecosistemas.net>  
Bovee, K.D. 1982. A guide to Stream Habitat. Analysis using the Instream Flow Incremental Methodology. Instr. Flow Inf. Paper 12. USDI Fish and Wildl. Serv. Washington. 248 pp.  
Butler, D. 2006. Decision Support Systems for urban water management. International Workshop On Hydro-Economic Modeling And Tools For Implementation Of The European Water Framework Directive. Valencia.  
Chung, F. I., Archer, M. C. y Devries, J. J. (1998). Network flow algorithm applied to California aqueduct simulation". *Journal of Water Resources Planning and Management*, 115 (2), 131-147.  
Collazos, G., M. Pulido Velázquez y J. Andreu. 2004. SSD para el análisis económico de sistemas de recursos hídricos. *IV Congreso Ibérico de Gestión y Planificación del Agua*. Tortosa (España). Versión en CD-Rom.  
Collazos, G. 2004. Sistema Soporte de Decisión para Evaluación y Optimización Económica de Sistemas de Recursos Hídricos Tesis doctoral.  
Collazos, G. 2006. *Manual del Usuario del SSD H2O*. Universidad Nacional de La Plata, Argentina. <http://www.ssd-h2o.com.ar>  
DHI. 2001. *MIKE BASIN 2001. Guía y Tutoría para su uso*. <http://www.dhisoftware.com/mikebasin>  
DOCE. 2000. Directiva 2000/60/EC del Parlamento Europeo y el Consejo por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*.  
García de Jalón, D. 1990. Técnicas hidrobiológicas para la fijación de caudales ecológicos mínimos. En: Ramos, A., Notario, A. y Baragaño, J.R. (eds.). *Libro homenaje al profesor D.M. García de Viedma*. Universidad Politécnica de Madrid, 183-196.  
González Ramón, A, Rubio Campos, J.C., López Geta, J.A., Ortuño Alcaraz, I., Martos Rosillo, S., Santiago Martín, A., Peinado, T. y Ortuño Morales, A. 2002. *Los acuíferos de la cabecera del río Víboras, potencial hídrico garante del abastecimiento a la comarca de Martos y Quiebrajano*. Presente y futuro de las aguas subterráneas en la provincia de Jaén. Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Hidrogeología, N° 7, 351-354.

- IGME-AAA. 2005. *Elaboración de directrices para la incorporación de criterios de calidad en la modelización de esquemas de utilización conjunta. Aplicación al abastecimiento del conjunto Quiebrajano-Víboras*. Instituto Geológico y Minero de España y Agencia Andaluza del Agua. Informe Inédito, 362 pp.
- Labadie, J. W. 1994. MODSIM. Interactive river basin network flow model. *Technical report, Department of Civil Engineering, Colorado State University*. <http://129.82.224.229/concepts/moddoc.html>.
- Martin, Q. W. 1983. Optimal operation of multiple reservoir system. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 106 (1), 58-74.
- Murillo, J.M. y Navarro, J.A. 2006. Caudales ecológicos y gestión conjunta de recursos hídricos. Aplicación al sistema Quiebrajano- Víboras (Jaén). III Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente. Zaragoza. Versión en CD-Rom.
- Murillo y Navarro, 2008. Empleo de modelos de análisis global de recursos hídricos como primera actuación a emprender en propuestas de gestión que contemplen operaciones de recarga artificial de acuíferos. *Boletín Geológico y Minero*, 119 (2), 247- 272.
- Murillo, J.M.; Rodríguez Medina, I.C.; Rubio Campos, J.C. y Navarro lañez, J. A. 2005. Mantenimiento hídrico de cursos fluviales y uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas. *VI Simposio del Agua en Andalucía*. Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas N° 14, Tomo II, 789-798.
- Pulido-Velázquez, M. 2003. *Optimización económica de la gestión del uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas en un sistema de recursos hídricos. Contribución al Análisis Económico propuesto en la Directiva Marco Europea del Agua*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Raskin, P., Sieber, J. y Huber-Lee, A. 2001. User Guide for WEAP 21. *Stockholm Environment Institute*.
- Rubio Campos, J.C. 2002. Planes de investigación seguidos y previstos por el IGME en la provincia de Jaén. *Presente y futuro de las aguas subterráneas en la provincia de Jaén*. Instituto Geológico y Minero de España, Serie: Hidrogeología N° 7, 177-197.
- Sahuquillo, A. y Sánchez González, A. 1983. Metodología para la realización de estudios de utilización conjunta de aguas superficiales y aguas subterráneas. *Boletín de Informaciones y Estudios*, 43, 1-95.
- VUT 2001. REALM User's Manual (Version W1.4h). *Victoria University of Technology and Department of Natural Resources and Environment*.

Recibido: enero 2009  
Revisado: octubre 2009  
Aceptado: febrero 2010  
Publicado: abril 2010