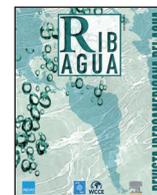




RIBAGUA

www.elsevier.es/ribagua



Artículo científico

El impacto de los caudales medioambientales en la satisfacción de la demanda de agua bajo escenarios de cambio climático

A. Chávez-Jiménez^{a,c*} y D. González-Zeas^{b,c}^a Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Piura, Piura, Perú.^b Asociación CFE-PYPSA-CVA-ICA, Quito, Ecuador^c Departamento de Ingeniería Civil: Hidráulica y Energética, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historia del artículo:

Recibido el 17 de noviembre de 2014

Aceptado el 30 de julio de 2015

Palabras clave:

Caudales medioambientales
Indicadores de escasez de agua
Cambio climático
Sistema de recursos hídricos

RESUMEN

El uso creciente del recurso hídrico para satisfacer las diferentes demandas de un sistema, muchas veces por encima de su disponibilidad hídrica, ha generado una reducción en el nivel de satisfacción de dichas demandas, así como una reducción en los caudales medioambientales necesarios para alcanzar el buen estado ecológico. A largo plazo, estos problemas pueden verse intensificados como consecuencia del cambio climático. La satisfacción de las demandas de un sistema sin afectar al medio ambiente es uno de los principales objetivos de una eficaz gestión del recurso hídrico. La consideración de unos requerimientos ambientales puede influir en la sensibilidad de un sistema en el momento de satisfacer adecuadamente las diferentes demandas. Este artículo se enfoca en evaluar dicha sensibilidad a largo plazo, mediante el uso de dos indicadores de eficiencia que permiten identificar los problemas de escasez de agua bajo diferentes escenarios de reducciones en las aportaciones. Los requerimientos ambientales se determinaron tomando en cuenta las distribuciones mensuales y anuales de las aportaciones para los diferentes escenarios futuros. Como resultado de aplicar la metodología a la cuenca del Guadalquivir, en España, se observa que los problemas de escasez de agua que actualmente padece la cuenca puedan verse intensificados bajo cambio climático, comprometiendo una adecuada satisfacción de las demandas de agua del sistema. Estos problemas podrían reducirse, e incluso eliminarse, si se consigue limitar el consumo de agua por debajo de la disponibilidad hídrica que presente la cuenca, especialmente en los recursos destinados a la agricultura.

© 2015 IAHR y WCCE. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

The impact of environmental flows in meeting water demand under climate change scenarios

A B S T R A C T

The increasing use of water resources in order to meet the different demands of a system, often above their water availability has led to inadequate attention to such demands, as well as, has generated a reduction in environmental flows needed to achieve good water status. In the long term, these problems may be intensified under climate change scenarios. An adequate attention of the system demands without affecting the environment is one of the main objectives of the water resources management. The consideration of the environmental flows can influence the sensitivity of a system when addressing the different demands. This paper focuses on assessing this sensitivity to long term by using two efficiency indicators, which ones allow to identify water scarcity problems under different scenarios of flows reduction. Environmental requirements are determined by taking into account the monthly and

Keywords:

Environmental flows
Water scarcity indicators
Climate change
Water resources system

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: adriadna.chavez@udep.pe; adriadna.chavez@gmail.com (A. Chávez).

annual distributions of the flows for different future scenarios. The proposed methodology is applied to the Guadalquivir basin in Spain. The results show that the current water scarcity problems of the basin can be intensified when the environmental requirements are considered in the system. These problems could be reduced or even eliminated, if water consumption is limited below the water availability of the basin, especially in the resources for agriculture.

© 2015 IAHR y WCCE. Published by Elsevier España, S.L.U. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

La creciente presión sobre los recursos hídricos, debida a un consumo muchas veces por encima del recurso disponible, ha provocado problemas de escasez de agua de diversa intensidad a lo largo del mundo [1]. De igual manera, este incremento en el consumo de agua ha generado fuertes alteraciones en el régimen de los ríos, impactando negativamente en los ecosistemas fluviales y comprometiéndolo la sostenibilidad del recurso hídrico [2,3]. Esto ha motivado un creciente interés en buscar un equilibrio entre la atención de las diferentes demandas de un sistema y sus requerimientos ambientales, como puede verse en Díez-Hernández [4]; Sun *et al.* [5]; Yang *et al.* [6]; Paredes-Arquiola *et al.* [7] y Milano *et al.* [8], siendo este equilibrio uno de los aspectos relevantes para alcanzar una gestión integrada de los recursos hídricos [6]. Un claro ejemplo es la Directiva Marco Europea (DME) que busca alcanzar un “buen estado ecológico” de todos los cuerpos de agua mediante un enfoque integrado para la gestión de dicho recurso [9].

Se puede encontrar en la literatura una extensa cantidad de estudios donde se evalúa la mejor distribución de los recursos hídricos para atender las diferentes demandas y requerimientos ambientales del sistema, a corto y mediano plazo, y para regiones específicas. Requiriéndose una gran cantidad de información para la descripción de las diferentes variables utilizadas, entre ellas, los requerimientos ambientales. Estos requerimientos ambientales pueden encontrarse como demandas o restricciones dentro del sistema. Si estos requerimientos son considerados como demandas, están sujetos a reducciones en función de su valor económico y de los objetivos perseguidos por los gestores del agua [10-12]. Al ser considerados como restricciones, la primera prioridad en la distribución del recurso hídrico es atender dicho requerimiento [13-15]. Por ejemplo, en España, en la Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH), es obligatoria la consideración de caudales medioambientales (Q_c) como una restricción en el sistema [16]. Siendo estas restricciones dadas como caudales mínimos que permitan mantener las condiciones ambientales necesarias para mantener la fauna y la flora en los diferentes ríos [17]. El cálculo de estos requerimientos ambientales puede determinarse bajo una gran variedad de métodos como, por ejemplo, Beven y Freer, Thoms y Sheldon, King *et al.*, Mathews y Richter, Peñas *et al.* [18-22], entre otros. En Tharme [23] se clasifican todos estos métodos en cuatro grandes grupos: métodos hidrológicos, hidráulico, de simulación del hábitat y métodos holísticos. La selección de estos métodos se encuentra en función de los ecosistemas y de los objetivos ambientales perseguidos [24], de la disponibilidad de datos, capacidad técnica y aspectos económicos [25]. Siendo los métodos hidrológicos los más sencillos de aplicar. Entre los métodos hidrológicos, se encuentra el método del caudal mínimo, que se obtiene como un porcentaje del caudal medio anual, dependiendo de las condiciones fluviales [23] o como porcentajes del caudal mensual [26]. Los métodos que se agrupan en las tres restantes categorías dadas por Tharme [23] requieren una combinación de datos hidrológicos, hidráulicos y biológicos que, muchas veces, pueden no ser de fácil acceso.

En el futuro se espera una reducción en la disponibilidad del recurso hídrico debida a los efectos del cambio climático [27-28], causando una reducción en el nivel de satisfacción de las diferentes demandas de un sistema e incrementándose, con ello, los problemas de escasez de agua [1,29]. Debido a que, a largo plazo, los pronósticos por efecto del cambio climático se encuentran rodeados de incertidumbres [30], una evaluación detallada del comportamiento del sistema generaría un mayor grado de error en los resultados. Sin embargo, sigue siendo necesario conocer como son satisfechas las diferentes demandas de un sistema bajo restricciones ambientales y debido a dichos efectos climáticos. Hay una variedad de estudios que buscan relacionar los problemas de escasez de agua actuales y futuros con el comportamiento del sistema que presenta restricciones ambientales. Muchos de ellos consideran un conjunto de indicadores [31-33], por ejemplo, se hace uso del indicador de estrés de agua (Water Stress Indicator [WSI]), con el cual se evalúan los problemas de escasez de agua mediante la relación entre las extracciones de agua para todos los usos de la región y el recurso disponible, donde el recurso se determina como la diferencia entre el recurso medio anual y los requerimientos ambientales. Bajo este indicador se puede conocer cuánta demanda puede ser atendida en una cuenca, pero no se puede conocer cómo es distribuido el recurso para cada uso de agua y las garantías con las que son satisfechas dichas demandas, variable de importancia en las decisiones de gestión del recurso hídrico.

El establecimiento de unos Q_c mínimos junto con las restricciones existentes de la variabilidad climática natural, el cambio climático y los diferentes usos de la cuenca, hacen que la regulación y la asignación del agua sean el núcleo de la gestión del recurso hídrico [34]. Por ello, en este estudio, se propone evaluar cómo serían atendidas a futuro las diferentes demandas de un sistema de recursos hídricos frente a diversos escenarios de reducciones de las aportaciones por efecto del cambio climático y requerimientos ambientales, relacionando no solo los volúmenes de agua suministrada, sino la garantía con la que son satisfechas las demandas de dicho sistema. Esta propuesta permitiría evaluar la sensibilidad del comportamiento del sistema a las variaciones en la disponibilidad hídrica bajo diferentes proyecciones hidrológicas (contexto climático) y requerimientos ambientales. Brindando, con ello, una herramienta de ayuda en la identificación de acciones prioritarias de gestión. Para ello se han seleccionado dos indicadores que identifican problemas de escasez de agua, mediante la evaluación de los volúmenes de agua suministrada y las garantías con la que dichas demandas son satisfechas. Estos indicadores son el indicador de Satisfacción de la Demanda (I_1) y de Confiabilidad de la demanda bajo cambio climático (I_{2p}) [35]. Dichos indicadores toman en cuenta los diferentes usos de agua (demandas), prioridades de uso de agua y requerimientos ambientales. La determinación de los requerimientos ambientales se ha realizado basándose en métodos hidrológicos. Tomando como base que estos métodos suelen usarse cuando hay insuficiente información cuantitativa acerca de cómo las diferentes especies acuáticas responden a las variaciones hidrológicas [6], característica que se presentaría a largo plazo y que se intensifica por las incertidumbres que rodean los pronósticos, debido a los efectos del cambio climático. La aplica-

ción de esta propuesta se ha llevado a cabo en la cuenca del Guadalquivir (cuenca española).

2. Metodología

La metodología propuesta está compuesta por cinco pasos, tal como se resume en la figura 1. Primero, considerando el sesgo existente en las simulaciones de escorrentía de los modelos climáticos regionales [36], se ha generado un conjunto de proyecciones hidrológicas que representan las aportaciones futuras debido a los efectos del cambio climático. Segundo, se ha determinado un conjunto de Q_e a través de dos métodos hidrológicos. Tercero, se ha construido un modelo de optimización del sistema de recursos hídricos. Cuarto, se ha realizado la caracterización del comportamiento de un sistema de recursos hídricos mediante el uso de dos indicadores que evalúan su rendimiento, tanto en la cantidad como en la calidad del servicio dado. Finalmente, en el quinto paso se ha efectuado el análisis de sensibilidad del comportamiento de un sistema de recursos hídricos bajo diferentes requerimientos ambientales (Q_e) y diversos escenarios de cambio climático.

2.1. Generación de las proyecciones hidrológicas futuras

Los efectos del cambio climático en el futuro generarían variaciones en las aportaciones, aunque de diferente magnitud a lo largo del mundo debido a los modelos climáticos empleados [37]. Pese a la relevancia de dicha información, se debe tener en cuenta las incertidumbres asociadas en torno a su creación [38] y a que los pronósticos de dichos modelos no siempre reproducen la complejidad hidrológica de las diferentes regiones analizadas [39]. Es, por tanto, necesario construir proyecciones hidrológicas que reflejen las variabilidades en los caudales futuros dados por diferentes modelos climáticos, pero, a su vez, que mantengan las características hidrológicas de la región de estudio. Para ello, se ha seleccionado la metodología propuesta por Chavez-Jimenez *et al.* [35]. En esta metodología, las proyecciones (aportaciones futuras) son construidas mediante la perturbación de las aportaciones que conforman el periodo de control o situación actual. Las perturbaciones son tanto alteraciones en la media ($\Delta\mu$) como en el coeficiente de variación (ΔCV) y son producto de la comparación de las aportaciones futuras

respecto a las aportaciones obtenidas en el periodo de control para diferentes modelos climáticos.

Las aportaciones en el periodo de control fueron tomadas del Sistema Integrado de Modelación Precipitación-Aportación (SIMPA) [40] de tipo conceptual y distribuido, que simula caudales medios mensuales en régimen natural en cualquier punto de la red hidrográfica de una cuenca [41]. Con este modelo se obtienen las series mensuales de los caudales en régimen natural en toda España con una cuadrícula de resolución de 1 km².

La determinación de las perturbaciones se ha trabajado con la información del proyecto PRUDENCE [42] debido a la disponibilidad de información de aportaciones, tanto para el periodo actual (1961-1990) como para el futuro (2071-2100). Esta información permite la determinación de los valores de $\Delta\mu$ y ΔCV . Los modelos climáticos del PRUDENCE han sido utilizados en diferentes puntos de Europa [28, 43-46] siendo el GKSS y el SMHI los más representativos del área de España en escenarios de control [47]. Considerando la gran variabilidad de los resultados de los modelos climáticos, es necesario considerar un conjunto de estos, de tal manera que se tome en cuenta la incertidumbre asociada a dichos modelos. Para este trabajo, se han seleccionado las aportaciones obtenidas por un conjunto de modelos climáticos regionales bajo el escenario de emisiones A2, debido a que es la previsión más pesimista para el mundo futuro y porque son los que utiliza habitualmente la administración española de forma oficial [48].

2.2. Determinación de los Q_e

De acuerdo con la literatura existente, se destaca una gran variedad de metodologías para abordar el cálculo de los Q_e [49-50], las cuales se pueden agrupar en distintas categorías: hidrológicas, hidráulicas, de simulación de hábitat y holísticas. No obstante, muchas veces no se dispone de la información cuantitativa necesaria para evaluar la respuesta de las diferentes especies acuáticas a las variaciones hidrológicas [6]. En España, de acuerdo con la IPH, el régimen de Q_e se establece de modo que permita mantener, de forma sostenible, la funcionalidad y estructura de los ecosistemas acuáticos y de los ecosistemas terrestres asociados, contribuyendo a alcanzar el buen estado o potencial ecológico en ríos o aguas de transición [16]. La determinación de estos caudales, a corto y medio plazo, requiere de información hidrológica, características hidráulicas, curvas de preferencia del hábitat físico para la especie o especies objetivo, así como la aplicación de la metodología *Instream Flow Incremental Methodology* (IFIM) [51]. A largo plazo, esta información no se encontraría disponible con la confiabilidad necesaria, frente a ello se acude a métodos hidrológicos debido a la sencillez para su determinación y a la disponibilidad de la información hidrológica requerida para su cálculo. Por otro lado, estos métodos se consideran los más adecuados para el nivel de planificación en el desarrollo de los recursos hídricos o como información para estudios preliminares [52].

El objetivo de este estudio es poder evaluar la sensibilidad del comportamiento de un sistema de recursos hídricos frente a diversas proyecciones hidrológicas y requerimientos ambientales. La generación de las proyecciones hidrológicas se comentó en el apartado 2.1. Respecto a los requerimientos ambientales, se determinó un conjunto de siete valores de Q_e que representarían los mínimos requerimientos hidrológicos a largo plazo en un contexto de cambio climático. Para la determinación de dichos caudales, se emplearon métodos hidrológicos, tres de ellos calculados como los percentiles 5, 10 y 15 de las aportaciones medias mensuales ($AP0_{mm}$) y tres como los porcentajes 5, 10 y 15% de las aportaciones medias anuales ($AP0_{ma}$). También se ha considerado un séptimo valor de $Q_e = 0$, con el objeto de marcar un nivel de referencia que permita medir la sensibilidad en el comportamiento del sistema frente a diversos Q_e .

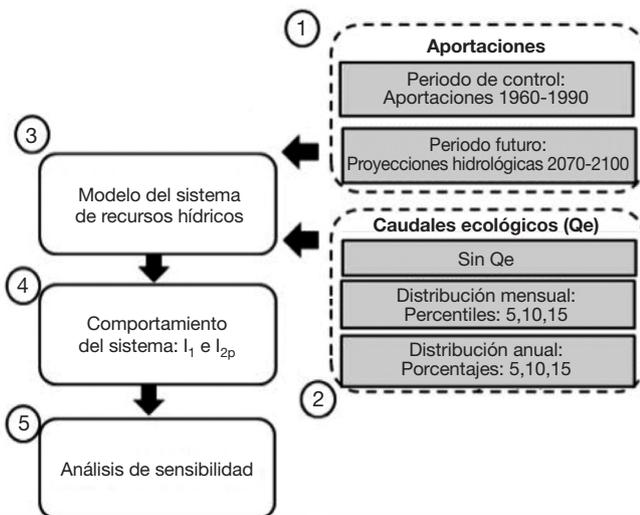


Figura 1. Marco metodológico. Pasos que conforman la metodología propuesta.

2.3. Modelo del sistema de recursos hídricos

La simulación del aprovechamiento hidráulico del sistema se ha realizado mediante el modelo de optimización de recursos hídricos OPTIGES [53]. Este modelo ofrece como resultados los déficit a escala mensual para todo el periodo de estudio y para cada una de las demandas consideradas. Estos resultados se encuentran en función de las aportaciones, volúmenes de regulación y volúmenes de demandas, así como de los criterios de prioridad según el tipo de demanda y las restricciones por pérdida de evaporación y Q_e .

En el futuro, y debido al cambio climático, se podrían ver afectados no solo las aportaciones, sino también los volúmenes demandados, así como el desarrollo de nueva infraestructura. Sin embargo, dado que el objetivo es valorar la sensibilidad del comportamiento de un sistema de recursos hídricos mediante el análisis del nivel de satisfacción de sus demandas debido a la consideración de diversos Q_e , se ha considerado únicamente la variación de las aportaciones y de los Q_e .

Se han considerado dos periodos de estudio. El primero, *el periodo de control*, donde las aportaciones, volúmenes de regulación y demandas corresponden al periodo 1960-1990. El segundo, *el periodo futuro* correspondiente a 2070-2100, donde solo las aportaciones (proyecciones hidrológicas) sufren variaciones debido a los efectos del cambio climático. En ambos periodos se considera un conjunto de valores de Q_e determinados por métodos hidrológicos (apartado 2.2).

2.4. Caracterización del comportamiento de los sistemas de recursos hídricos

Una eficaz gestión de los recursos hídricos busca una adecuada satisfacción de las diferentes demandas de un sistema sin comprometer el buen estado ecológico de sus aguas. Alcanzar una adecuada satisfacción de las demandas de un sistema implica brindar el recurso de agua en la cantidad y en el momento requerido. Un buen estado ecológico requiere de ciertos volúmenes de agua que permitan mantener las condiciones ambientales necesarias para mantener la fauna y la flora en los diferentes ríos [17]. Este buen estado ecológico implicaría muchas veces la restricción de agua en las demandas del sistema (reducción de los niveles de satisfacción de sus demandas). La distribución del recurso hídrico es una tarea compleja, por tanto, conocer el comportamiento o respuesta del sistema para satisfacer adecuadamente sus demandas bajo restricciones ambientales es de suma importancia.

Se han seleccionado dos indicadores: indicador de satisfacción de la demanda (I_1) e indicador de confiabilidad de la demanda bajo cambio climático (I_{2p}) [35] para poder caracterizar el comportamiento del sistema. Esta caracterización se realiza mediante la identificación de problemas de escasez de agua que puede presentar el sistema en función de dos parámetros: los suministros con los que son atendidas las diferentes demandas (volumen) (I_1 – Ec. 1) y las garantías con las que son satisfechas dichas demandas (I_{2p} – Ec. 4). La determinación de estos indicadores se encuentra en función de los resultados de la optimización del sistema en estudio y de la información obtenida por la curva garantía-suministro. Esta curva representa los volúmenes suministrados con una garantía dada o mayor. En Martín-Carrasco *et al.* [54] y Chávez-Jiménez *et al.* [35] se puede encontrar una mayor información sobre la construcción de dicha curva.

$$I_1 = \sum_{m=1}^K \alpha_m \beta_m \frac{S_m}{D_m} \quad (1)$$

Donde “ m ” representa los diferentes usos de agua ($m = 1, 2, 3, \dots, M$); M es el número de usos de agua en el sistema, α_m es el peso relativo para cada uso de agua “ m ” (Ec. 2); β_m es un peso de relevancia que es asignado subjetivamente en función de la importancia de los usos de agua en el sistema, pero cuyos valores se encuentran restringidos por la Ec. 3; S_m es el suministro promedio de agua para el uso de agua “ m ” independientemente de la garantía con la que es atendida ($Mm^3/año$) y D_m es el volumen de agua requerida por cada uso de agua “ m ” ($Mm^3/año$). Tanto S_m como D_m curva garantía-suministro son obtenidos de la curva garantía-suministro.

$$\alpha_m = \frac{D_m}{\sum_{m=1}^M D_m} \quad (2)$$

$$\sum_{m=1}^M \alpha_m \beta_m = 1 \quad (3)$$

El indicador I_{2p} cuantifica las garantías con las que son satisfechas las demandas en un sistema afectado por el cambio climático. La garantía se entiende como la probabilidad de que un sistema sea capaz de satisfacer las demandas de manera adecuada. Para cada uso de agua “ m ” se definen diferentes garantías aceptables G_m . Para este estudio se estableció una garantía aceptable del 85% para las demandas de riego y del 95% para las demandas urbanas.

$$I_{2p} = \sum_{m=1}^M \alpha_m \beta_m I_{2pm} \quad (4)$$

Donde I_{2pm} es el indicador de confiabilidad de la demanda bajo cambio climático para cada uso de agua “ m ” (Ec. 5):

$$I_{2pm} = \frac{\int_0^{G_m} F(G)_m dG_m}{D_m * G_m} = \frac{ACGS_m}{DG_m} \quad (5)$$

Donde $F(G)_m$ es la función de la curva garantía-suministro, $ACGS_m$ es el área bajo la curva garantía-suministro para garantías desde el 0% a G_m y DG_m es el producto de la demanda D_m y la garantía G_m para cada uso de agua “ m ”.

El uso conjunto de estos indicadores permite identificar los problemas de escasez de agua que puede presentar un sistema. Estos problemas pueden ser muy serios (I_1 entre 0-0,7, I_{2p} entre 0-0,6), serios (I_1 entre 0,7-1,0, I_{2p} entre 0-0,6), medios (I_1 entre 0,7-1,0, I_{2p} entre 0,6-0,75) o no presentar problemas (I_1 entre 0,80-1,0, I_{2p} entre 0,75-1,0). La intensidad de estos problemas se encuentra en función de la calidad y confiabilidad con que las demandas son satisfechas. A medida que la cantidad de agua y la confiabilidad con la que son satisfechas las demandas aumentan, los problemas van siendo menores, hasta que no se presentan problemas de escasez.

2.5. Análisis de sensibilidad del comportamiento del sistema de recursos hídricos

Este análisis se realiza mediante la comparación del comportamiento que presenta un sistema de recursos hídricos, a través de la identificación de los problemas de escasez de agua (mediante el uso de los indicadores I_1 e I_{2p}), bajo tres enfoques. En el *primer enfoque*, se compara el comportamiento del sistema en el periodo de control y bajo diferentes valores de Q_e . En el *segundo enfoque*, la comparación se realiza para cada una de las proyecciones hidrológicas bajo

los diferentes valores de Q_e . Y en el *tercer enfoque*, se realiza la comparación entre el periodo de control y cada una de las proyecciones hidrológicas que conforman el periodo futuro. El análisis de estos tres enfoques permitiría apreciar la influencia de los Q_e (impuestos como restricciones en el sistema) en la satisfacción de las demandas de agua tanto en el periodo de control como en el futuro, tomando en cuenta que dichas restricciones generan cambios en la distribución del recurso hídrico [55].

3. Caso de estudio

La metodología propuesta se aplicó a la cuenca del Guadalquivir, ubicada al sur de España (fig. 2). Esta cuenca presenta actualmente problemas de escasez de agua debido a un fuerte consumo de los recursos por encima de su disponibilidad hídrica [35, 56,57]. El alto consumo del recurso destinado para la agricultura (en promedio del 90%) (tabla 1) es una de las principales razones de este problema. La explotación intensa de los recursos impacta negativamente en el buen estado de las masas de agua superficiales, encontrándose que un 74% de estas masas se encuentran en riesgo de no alcanzar los objetivos medioambientales impuestos por el Plan Hidrológico de la cuenca y la Directiva Marco del Agua [58].

La información requerida para la modelación de la cuenca fue tomada del Plan Hidrológico de la cuenca Agua [59], como se muestra en la tabla 1. Los valores de las aportaciones correspondientes al periodo de control fueron tomadas del SIMPA [40]. Los Q_e se establecieron en seis tramos de la cuenca, como se muestra en la figura 4 y han sido considerados en el modelo como restricciones en el momento de distribuir el recurso hídrico entre las diferentes demandas, tomando en cuenta lo dictado en la IPH [16].

Para finales del siglo XXI, según predicciones referentes al cambio climático, se espera en España un aumento de la temperatura y una reducción en las precipitaciones [60] que repercutirían en la escorrentía. Siendo más fuertes estas reducciones en el sur de España, región donde se ubica la cuenca del Guadalquivir.

Tabla 1

Valor de las principales variables que conforman el modelo de la cuenca y el número de elementos por cada una de estas variables considerados en la construcción del modelo de la cuenca. Área de la cuenca (A), aportación media anual (APO), volumen de almacenamiento (V), demanda total (D_t), demanda agrícola (D_a) y demanda urbana (D_u)

Variable	Valor	N.º de elementos
A (Mm ²)	57.500	–
APO (Mm ³ /año)	6.840	48
V (Mm ³ /año)	6.405	35
D_t (Mm ³ /año)	2.858	29
D_a (%)	9	24
D_u (%)	91	5

Para el estudio se han determinado cinco proyecciones hidrológicas basadas en la metodología propuesta por Chavez-Jimenez *et al.* [35]. Estas proyecciones se construyeron perturbando las aportaciones en el periodo de control por alteración en la $\Delta\mu$ y el coeficiente de variación (CV) (tabla 2). Estas alteraciones proceden de la comparación de los valores de aportaciones futuras respecto a las aportaciones en el periodo de control del proyecto PRUDENCE [42]. Se destaca una tendencia a la reducción en la media y el aumento de la variabilidad de las aportaciones, con excepción de la proyección DM11, donde se presenta una reducción en dicha variabilidad.

4. Resultados

Como resultado de aplicar la metodología propuesta a los dos periodos de análisis (actual y futuro) y para el conjunto de los 7 valores de Q_e (3 determinados en función de las aportaciones medias mensuales–APO_{mm}, 3 en función de las aportaciones medias anuales–APO_{ma} y uno sin Q_e) se obtuvieron los valores de los indicadores I_1 e I_{2p} , así como las diferentes intensidades en los problemas de escasez de

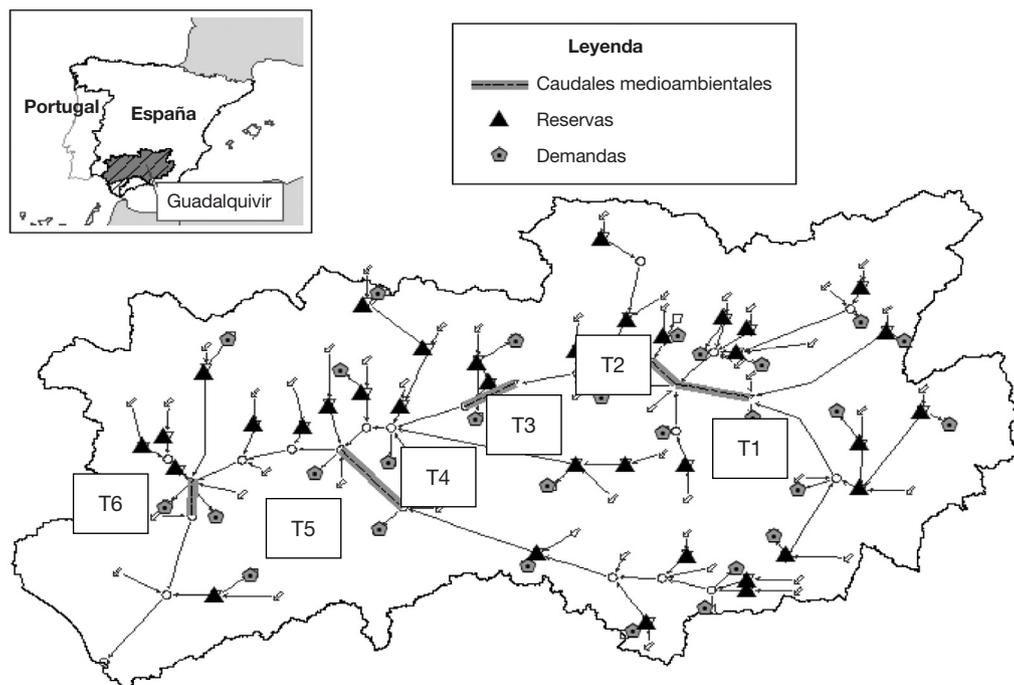


Figura 2. Ubicación de la cuenca del Guadalquivir.

Tabla 2

Alteración de la media y coeficiente de variación de los caudales anuales para el periodo 2070-2100. Christensen et al. [42] y las reducciones máximas necesarias (%) en las Da para alcanzar los niveles de las demandas máximas teóricas (DMT) determinadas por el modelo WAAPA, para los siete casos de Qe considerados en este estudio

Acrónimo del modelo	Proyecciones hidrológicas			Reducciones máximas de la demanda agrícola (%)					
	Escenario de emisiones A2		Sin Qe	Distribución mensual			Distribución anual		
	$\Delta\mu$	ΔCV		P5	P10	P15	5%	10%	15%
Ctrl	-	-	15	-7	-16	-20	-6	-20	-26
ICTP	-8	26	-44	-44	-47	-49	-51	-55	-57
MPI	-43	14	-38	-45	-49	-52	-44	-48	-53
DMI1	-50	-50	-29	-37	-42	-46	-33	-38	-42
ETH	-61	93	-68	-68	-68	-68	-71	-73	-74
GKSS	-69	97	-71	-71	-71	-71	-74	-76	-76

Proyecciones climáticas regionalizadas a través de un modelo regional: PRUDENCE-HadAM3.

DMI: Instituto Meteorológico de Dinamarca (HIRHAM)*; ETH: Escuela Superior Politécnica de Zúrich (CHRM)*; GKSS: Instituto de Investigación Costera* (CLM); ICTP: Centro Internacional de Física Teórica (RegCM)*; MPI: Instituto Max Planck (REMO)*.

* Modelo climático regional usado.

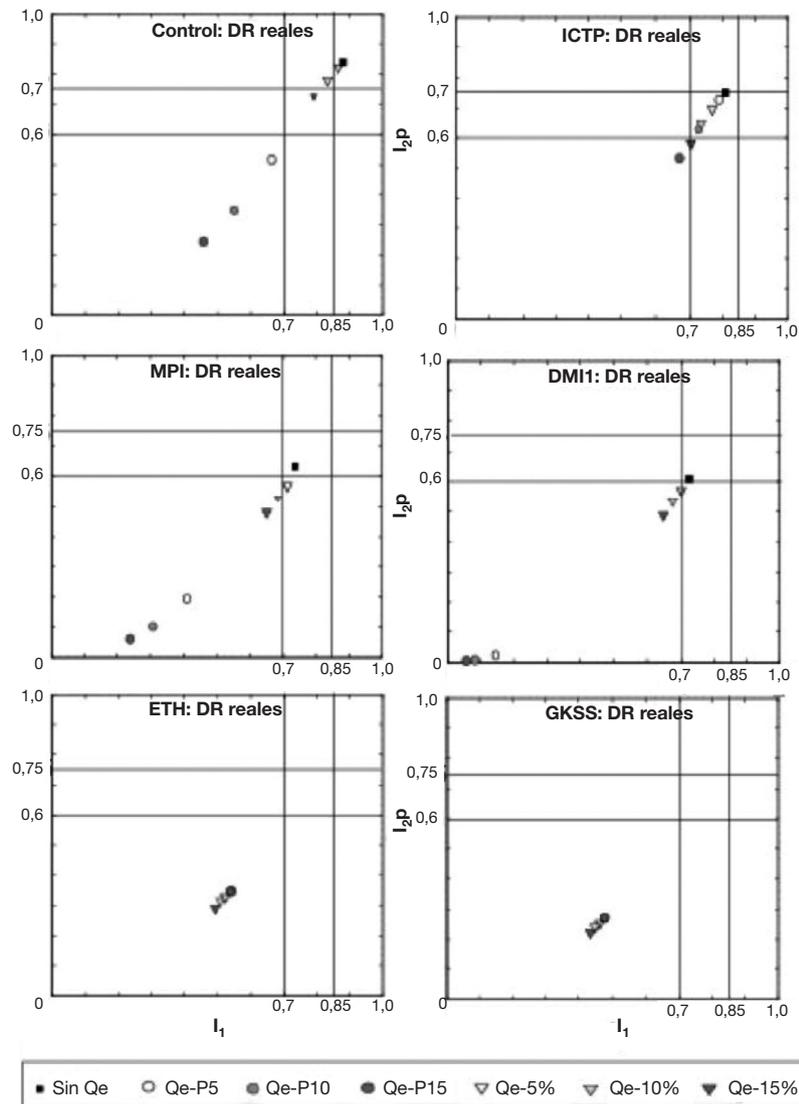


Figura 3. Problemas de escasez de agua bajo diferentes valores de Qe tanto para el periodo de control como para el periodo futuro. Los cuadrados negros muestran la intensidad de estos problemas cuando no se consideran valores de Qe. Los círculos muestran los problemas cuando se consideran Qe determinados como percentiles de las APO_{mm}, siendo los círculos blancos correspondientes al percentil 5, los grises al percentil 10 y los grises oscuros al percentil 15. Los triángulos invertidos muestran los problemas para Qe determinados como porcentajes de las APO_{mai}, siendo los triángulos de color blanco como el 5%, de color gris del 10% y de color gris oscuro del 15%. DMI: Instituto Meteorológico de Dinamarca; GKSS: Instituto de Investigación Costera; ETH: Escuela Superior Politécnica de Zurich; ICTP: Centro Internacional de Física Teórica; MPI: Instituto Max Planck; Qe: caudales medioambientales.

agua (fig. 3). Se observa una tendencia general al incremento en dichos problemas (reducción en el valor de los indicadores I_1 e I_{2p}) al considerarse mayores restricciones ambientales en el sistema. Este incremento en los problemas se debe a la reducción en la cantidad del suministro y en la garantía con las que son satisfechas las diferentes demandas de la cuenca, como se muestra en la figura 4 para el periodo de control y para tres proyecciones hidrológicas que conforman el periodo futuro: MPI, ETH y GKSS.

Con respecto al análisis de sensibilidad para el periodo de control (*primer enfoque*) se observa, tomando como base el comportamiento del sistema bajo el nivel de referencia ($Q_e = 0$), una gran variabilidad en los problemas de escasez de agua que van desde no presentarse problemas hasta presentarse problemas muy serios. Esta variabilidad responde al método con el cual se determinaron los Q_e . No se presentan problemas de escasez de agua en sistemas donde los Q_e se determinaron como el 5% de las APO_{ma} . Bajo el 10 y el 15% de la APO_{ma} , los problemas que experimenta la cuenca son medios. Los problemas muy serios se presentarán bajo los tres Q_e determinados en función de la APO_{mm} . Estas variables reducciones en I_1 e I_{2p} representan reducciones en los niveles de satisfacción de las demandas, mostrando la poca capacidad de respuesta que tiene actualmente la cuenca para poder satisfacer sus demandas adecuadamente.

Del análisis de sensibilidad en el futuro para cada una de las proyecciones hidrológicas (*segundo enfoque*), se observa una gran variabilidad en los problemas de escasez de agua. Esta variabilidad se debe al método de cálculo empleado en la determinación de los Q_e . Se observa que, en general, los mayores problemas se presentan bajo los Q_e determinados en función de las APO_{mm} (proyecciones ICTP, MPI y DMI1), con excepción de las proyecciones ETH y GKSS donde las mayores reducciones se se presentan cuando se consideran

los Q_e en función de la APO_{ma} . Por ejemplo, en la figura 5a se observa que los mayores valores de Q_e se presentan cuando éstos se han determinado en función de la APO_{mm} , reduciendo con ello el recurso hídrico disponible para satisfacer adecuadamente las demandas de riego, como se observa en la figura 4a (aumento de los déficit y reducción de las demandas satisfechas adecuadamente). Todo lo contrario sucede bajo la proyección ETH (fig. 5c), donde los mayores Q_e se determinaron en función de las APO_{ma} . Esto se ve reflejado también en la curva garantía–suministro mostrada en la figura 4c.

Finalmente, del análisis de sensibilidad en el comportamiento de la cuenca entre las diferentes proyecciones (*tercer enfoque*) se observa que a mayores reducciones de las aportaciones, mayores serían los problemas de escasez de agua bajo las diferentes magnitudes de Q_e , aunque no en la misma proporción, debido a la variabilidad de dichas aportaciones (fig. 3).

5. Discusión

De acuerdo con los resultados proporcionados en el apartado anterior, se puede decir que, bajo el primer enfoque, se observa que, actualmente, la cuenca tiene poca capacidad para satisfacer adecuadamente sus demandas, es decir, no logra suministrar ni la cantidad de agua necesaria ni satisfacer dichas demanda con unas garantías adecuadas. Por ello, se presentan problemas de escasez de agua como muestran los indicadores I_1 e I_{2p} y como lo mencionan otros autores [61,62]. Estos problemas se deben, principalmente, al fuerte consumo del recurso hídrico realizado por la agricultura (90%) (tabla 1). En el futuro, estos problemas de agua se incrementarían, de-

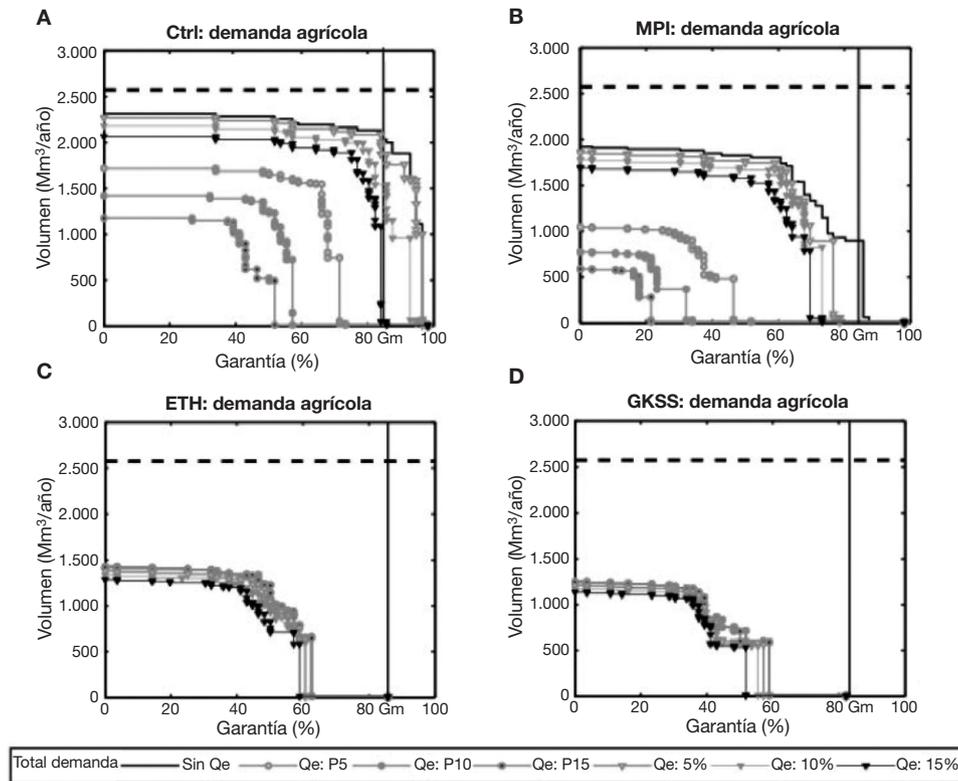


Figura 4. Curvas garantía–suministro para las demandas agrícolas (D_a) en el periodo de control y para tres proyecciones hidrológicas que conforman el periodo futuro: ICTP, ETH y GKSS. La garantía aceptable (G_m) para estas demandas se ha considerado del 85%. GKSS: Instituto de Investigación Costera; ETH: Escuela Superior Politécnica de Zurich; ICTP: Centro Internacional de Física Teórica; MPI: Instituto Max Planck; Q_e : caudales medioambientales.

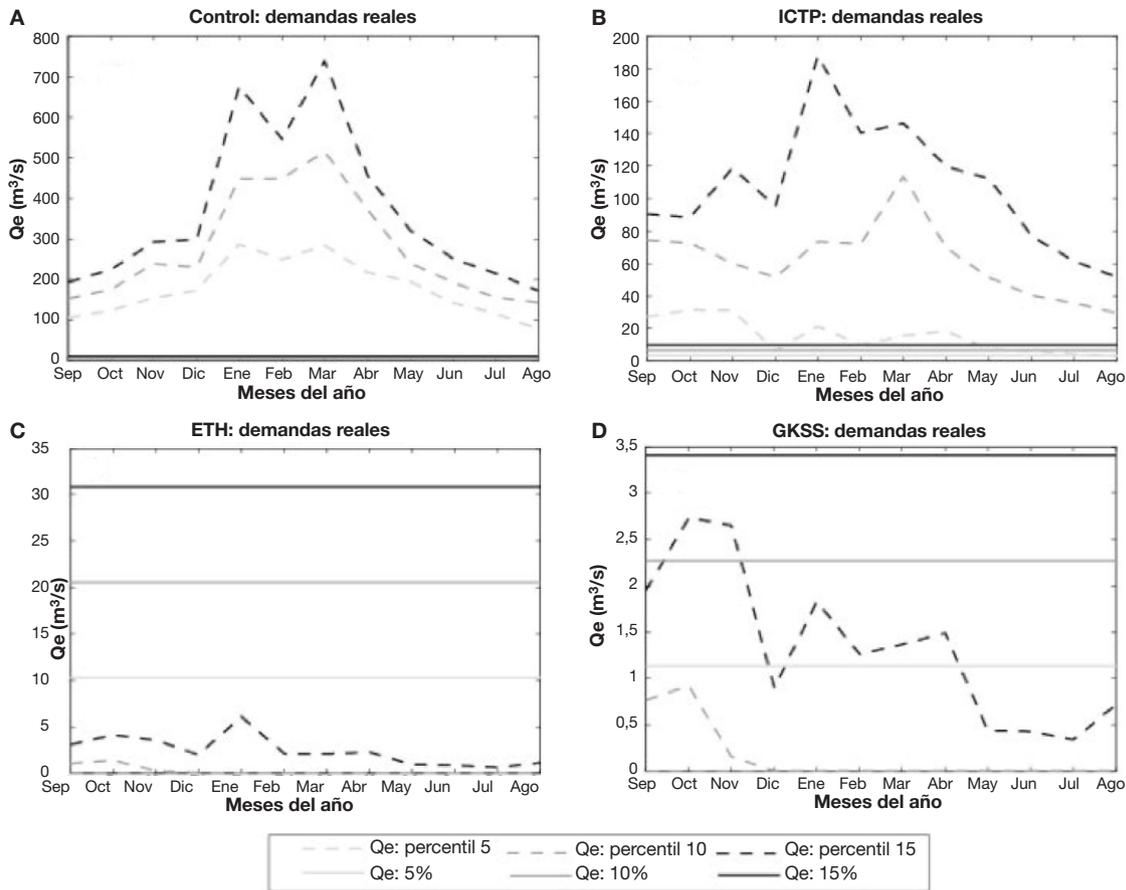


Figura 5. Caudales ambientales (Q_e) determinados en función de diferentes percentiles de las aportaciones medias mensuales (APO_{mm}) y de diferentes porcentajes de las aportaciones medias anuales (APO_{ma}) para el tramo 6 (uno de los seis tramos donde se han considerado Q_e según el plan hidrológico de la cuenca [Fig. 4]). GKSS: Instituto de Investigación Costera; ETH: Escuela Superior Politécnica de Zurich; ICTP: Centro Internacional de Física Teórica.

bido a una reducción en el recurso disponible, tanto por las restricciones ambientales impuestas al sistema (comparación bajo el segundo enfoque) como por la reducción de las aportaciones (comparación bajo el tercer enfoque). Aun manteniendo a futuro las mismas demandas de agua que en la situación de control, las garantías con las que serían satisfechas dichas demandas podrían variar, estando entre el 20-80% para las demandas agrícolas (fig. 4) dependiendo de las proyecciones hidrológicas usadas y la magnitud de los Q_e . Si bien, los métodos actualmente aplicados en la cuenca para la determinación de los Q_e permiten una mayor precisión en el volumen de agua requerida a lo largo del año que los aplicados en este estudio, los resultados permiten mostrar la tendencia en el comportamiento de la cuenca en el futuro. Por ejemplo, a largo plazo, la tendencia a la reducción en la satisfacción de la demanda obtenida en este estudio concuerda con los estudios realizados por el Plan Hidrológico del Guadalquivir, donde se espera, para el 2017, un incremento en la falta de garantías de las demandas, debido a las reducciones en las aportaciones del 8% como consecuencia del cambio climático y de los requerimientos ambientales impuestos [51]. Por todo ello, en términos generales, la cuenca tiene poca capacidad de respuesta para satisfacer, adecuadamente, sus demandas tanto en el periodo de control como en el periodo futuro.

Debido a las preocupaciones con respecto a la escasez de agua a largo plazo, y con el fin de conservar los suministros disponibles, algunos de los más grandes distritos de riego de la cuenca se encuentran en el proceso de modernización del sistema [63]. Sin embargo, debido a las fuertes reducciones en la disponibilidad hídrica

a futuro [60,64], este proceso de modernización no sería suficiente, siendo necesario limitar el consumo del recurso en aquellas demandas de menor prioridad para destinar el recurso hacia aquellas de mayor prioridad [62, 65].

Actualmente, se presenta en la cuenca un desequilibrio entre el recurso disponible y el recurso consumido [64]. Lograr un equilibrio entre estos recursos permitiría una eliminación de los problemas de escasez de agua. Por ello, se ha determinado para el sector agrícola, por ser el sector que mayor consumo del recurso realiza (90%) (tabla 1) y por ser un uso de menor prioridad que el abastecimiento poblacional, los valores máximos de las demandas de riego (VMDR) que pueden ser atendidas por la cuenca bajo un determinado nivel de garantía (85% para este estudio) y para cada una de las proyecciones hidrológicas utilizadas. Bajo estos VMDR se analizaron, nuevamente, los problemas de escasez de agua que podrían presentarse en la cuenca considerando los diferentes requerimientos ambientales y proyecciones hidrológicas. El objetivo es evaluar si los indicadores I_1 e I_{2D} son capaces de responder positivamente a estos cambios en las demandas.

Las VMDR fueron determinadas aplicando el modelo de Disponibilidad de Agua y Evaluación de Políticas de Adaptación WAAPA (*Water Availability and Adaptation Policy Assessment*) [66]. Estas VMDR son las máximas demandas que podrían ser atendidas en un determinado punto de la red hidrográfica bajo ciertas condiciones: distribución de la demanda, restricciones tales como Q_e , demandas prioritarias y garantía requerida. Este modelo permite realizar análisis globales de los recursos hídricos en sistemas regulados y para

diferentes escenarios de cambio climático sin requerir de una descripción detallada de la configuración del sistema, es decir, sin considerar una distribución espacial de la infraestructura y demandas del sistema.

En la tabla 2 se muestran los porcentajes de reducción de las D_a para alcanzar la VMDR. Los valores se muestran para ambos periodos de estudio: control y futuro, y para las alternativas de Q_e evaluados. En el periodo de control se requerirían reducciones de D_a entre el 7-26%. Solo para el caso donde no se considera Q_e , se puede aceptar un aumento de D_a en un 15%. En el futuro, las reducciones en las D_a se encontrarían entre el 29-76%. Tomando en cuenta las reducciones en las D_a , se determinaron los nuevos valores de I_1 e I_{2p} como se muestran en la figura 6, observándose dos aspectos de relevancia. Primero, una reducción significativa de los problemas de escasez de agua (aumento en los valores de I_1 e I_{2p}) (fig. 6). Por ejemplo, bajo las demandas actuales, se presentarían problemas serios de escasez de agua en el 75% de los casos (en total son 42 casos obtenidos de considerar los siete valores de Q_e tanto para el periodo de control como para las cinco proyecciones hidrológicas correspondientes al periodo futuro) y problemas muy serios para el 25% de los casos. Mientras que al considerar las VMDR, se presentaría una cuenca sin problemas de escasez de agua en el 75% de los casos y problemas medios en el 25% de los casos. Segundo, los valores de I_1 e I_{2p} son bastante similares entre las diferentes proyecciones y para los diferentes casos de Q_e si se comparan con los valores obtenidos al considerar las demandas actuales (fig. 6). Esta poca variabilidad en los valores de los indicadores muestra una mejora en la capacidad de respuesta de la cuenca frente a cambios en la variabilidad de las aportaciones como son las producidas por el cambio climático. Esta capacidad de reacción sería una herramienta de gran ayuda en el futuro para poder hacer frente a las incertidumbres que rodean los pronósticos debido al cambio climático. Sin embargo, se debe tener presente que, pese a estas mejoras, no se llega a eliminar en todas las proyecciones los problemas de escasez de agua. Esto se debe a que el modelo WAAPA no considera la distribución espacial de la infraestructura y de las demandas de la cuenca, como son consideradas al realizar la optimización de un sistema. Pero, dado que el objetivo es evaluar la respuesta de los indicadores frente a la reducción de las demandas de riego y la consideración de Q_e , se considera que las VMDR obtenidas con el modelo WAAPA son adecuadas.

De acuerdo con el análisis del comportamiento de la cuenca del Guadalquivir bajo diferentes restricciones medioambientales (Q_e) y reducciones en las aportaciones (proyecciones hidrológicas) se observa la poca capacidad de la cuenca para reaccionar frente a las incertidumbres futuras. Un camino para mejorar esta capacidad de

respuesta es lograr un consumo de recurso por debajo del recurso disponible, considerando previamente las restricciones impuestas al sistema como son los Q_e . De esta manera, se conseguiría un consumo sostenible en el tiempo. Para ello, sería necesario limitar el consumo de agua demandado por la agricultura. Estas mismas conclusiones pueden verse en Rodríguez Díaz *et al.* [63]. Sin embargo, frente a pronósticos tan pesimistas en el futuro (fuertes reducciones en las aportaciones), mantener un adecuado nivel medioambiental (consideraciones de Q_e) implicaría fuertes reducciones en las D_a . Por ejemplo, bajo la proyección GKSS sería necesaria una reducción de las D_a en un 76%. Esto plantea la necesidad de buscar un equilibrio entre los criterios medioambientales y los diferentes usos de agua. En Vörosmary *et al.* [67] y Naiman *et al.* [68] se considera que este equilibrio es crítico en muchas cuencas hidrográficas del mundo, donde se presenta un incremento en la población y en sus demandas.

6. Conclusiones

En este estudio se ha evaluado la sensibilidad en el comportamiento de la cuenca del Guadalquivir a largo plazo para satisfacer adecuadamente sus demandas frente a diversos requerimientos ambientales y bajo los efectos del cambio climático. La evaluación del comportamiento se realizó empleando dos indicadores: indicador de satisfacción de la demanda (I_1) y el indicador de confiabilidad en la atención de las demandas debido al cambio climático (I_{2p}). Con la finalidad de hacer frente a las incertidumbres asociadas al cambio climático, se seleccionaron cinco escenarios futuros. En función de estos escenarios se determinaron los diversos Q_e como percentiles y porcentajes de las aportaciones medias mensuales y anuales respectivamente.

Se destaca que los actuales problemas de escasez de agua que la cuenca del Guadalquivir experimenta podrían intensificarse en el futuro, debido a las fuertes reducciones en las aportaciones producto del cambio climático. Esto supone un aumento de las demandas que no serían satisfechas adecuadamente, siendo este nivel de satisfacción variable en función de los escenarios futuros y de la magnitud de los Q_e considerados. Es así que la cuenca del Guadalquivir se caracteriza por su poca capacidad de respuesta frente a eventos de alta incertidumbre en el futuro, como son los efectos del cambio climático.

Un camino para mejorar la capacidad de respuesta de la cuenca es alcanzar un equilibrio entre el recurso hídrico consumido y el recurso hídrico disponible. Una de las medidas que podrían apli-

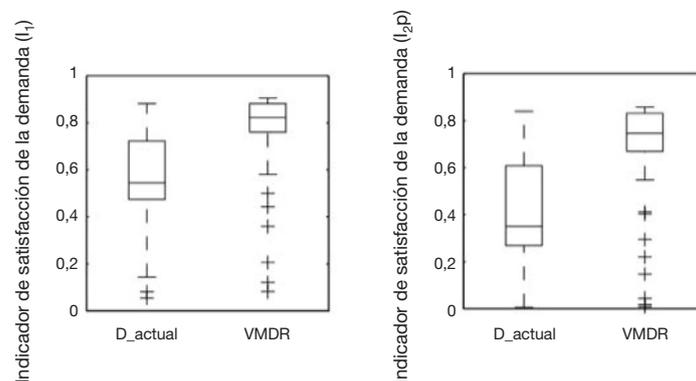


Figura 6. Valor de I_1 e I_{2p} cuando se consideran las demandas actuales (D_{actual}) y cuando se consideran las demandas máximas teóricas (VMDR), para el conjunto de casos analizados. Estos casos corresponden a las siete variaciones de Q_e tanto para el periodo de control como para las cinco proyecciones hidrológicas correspondientes al periodo futuro. Las líneas punteadas se extienden a 1,5 veces el rango intercuartílico hacia arriba y hacia abajo de la caja, la caja corresponde al 25% y 75%, la línea media horizontal dentro de cada caja representa el valor de la mediana; los valores atípicos están representados por cruces.

carse para conseguir una gestión sostenible en el tiempo es la reducción del volumen de agua requerida para el riego, por ser la actividad que más recurso hídrico consume, además de ser la de menor prioridad en el uso del agua. De esta manera, se lograría el aumento en la capacidad de respuesta de la cuenca frente a eventos no contemplados en la gestión y, a la vez, la posibilidad de hacer frente a las incertidumbres asociadas al cambio climático.

La presente investigación evalúa la sensibilidad de respuesta de la cuenca bajo Q_e obtenidos de acuerdo con consideraciones únicamente hidrológicas, no obstante, los Q_e involucran también criterios hidráulicos y ecológicos de importancia en su determinación. Esto se abordará en futuras investigaciones, de cara a determinar la sensibilidad del sistema frente a Q_e que integran las relaciones ecológicas que tienen lugar en los hábitat con las variables hidrológicas e hidráulicas.

Bibliografía

- [1] Alcamo J, Döll P, Henrichs T, Kaspar F, Lehner B, Rösch T, Siebert S. Global estimates of water withdrawals and availability under current and future "business-as-usual" conditions. *Hydrological*. 2003;48:339–348.
- [2] World Commission on Dams (WCD) (2000) Dams and Development. A New Framework for Decision-making. The report of the World Commission on Dams. London: Earthscan Publications.
- [3] World Conservation Union (IUCN) (2000) Vision for Water and Nature. A World Strategy for Conservation and Sustainable Management of Water Resources in the 21 st Century. IUCN: Gland, Switzerland and Cambridge, UK.
- [4] Díez-Hernández JM. Bases metodológicas para el establecimiento de caudales ecológicos en el ordenamiento de cuencas hidrográficas. *Fish*. 2005;22(2):152–174.
- [5] Sun T, Yang ZF, Cui BS. Critical Environmental Flows to Support Integrated Ecological Objectives for the Yellow River Estuary, China. *Water Resour Manag*. 2007;22:973–89. doi: 10.1007/s11269-007-9205-9
- [6] Yang ZF, Sun T, Cui BS, Chen B, Chen G.Q. Environmental flow requirements for integrated water resources allocation in the Yellow River Basin, China. *Commun Nonlinear Sci Numer Simul*. 2009;14:2469–2481. doi: 10.1016/j.cnsns.2007.12.015
- [7] Paredes-Arquiola J, Andreu-Álvarez J, Martín-Monerris M, Solera A. Water Quantity and Quality Models Applied to the Júcar River Basin, Spain. *Water Resour Manag*. 2010;24:2759–79. doi: 10.1007/s11269-010-9578-z
- [8] Milano M, Ruelland D, Dezetter A, Fabre J, Ardoin-Bardin S, Servat E. Modeling the current and future capacity of water resources to meet water demands in the Ebro basin. *J Hydrol*. 2013;500:114–126. doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.07.010
- [9] EU/2000/60/EC-WFD (2000) Directive of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action in the field of water policy (2000/60/EC).
- [10] Gillig D, McCarl BA, Boadu F. An Economic, Hydrologic, and Environmental Assessment of Water Management Alternative Plans for the South Central Texas Region. *J Agric Appl Econ*. 2001;33:59–78.
- [11] Wurbs R. Modeling river/reservoir system management, water allocation, and supply reliability. *J Hydrol*. 2005 300:100–113. doi: 10.1016/j.jhydrol.2004.06.003
- [12] George B, Malano H, Davidson B, Hellegers P, Bharati L, Massuel S. An integrated hydro-economic modelling framework to evaluate water allocation strategies I: Model development. *Agric Water Manag*. 2011;98:747–758. doi: 10.1016/j.agwat.2010.12.004
- [13] Xevi E, Khan S. A multi-objective optimisation approach to water management. *J Environ Manage*. 2005;77:269–77. doi: 10.1016/j.jenvman.2005.06.013
- [14] Fraiture C. Integrated water and food analysis at the global and basin level. An application of WATERSIM. *Water Resour Manag*. 2006;21:185–98. doi: 10.1007/s11269-006-9048-9
- [15] Pérez-Díaz JI, Millán R, García D, Guisández I, Wilhelmi J.R. Contribution of re-regulation reservoirs considering pumping capability to environmentally friendly hydropower operation. *Energy*. 2012;48:144–152. doi: 10.1016/j.energy.2012.06.071
- [16] IPH (2008) Instrucción de Planificación Hidrológica. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino – 15340-ORDEN ARM/2656/2008, de 10 de septiembre. Boletín Oficial del Estado. 2008;229:38472–582.
- [17] Pérez-Díaz JI, Wilhelmi JR. Assessment of the economic impact of environmental constraints on short-term hydropower plant operation. *Energy Policy*. 2010;38:7960–70. doi: 10.1016/j.enpol.2010.09.020
- [18] Beven K, Freer J. Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology. *J Hydrol*. 2001;249:11–29. doi: 10.1016/S0022-1694(01)00421-8
- [19] Thoms MC, Sheldon F. An ecosystem approach for determining environmental water allocations in Australian dryland river systems: The role of geomorphology. *Geomorphology*. 2002;47:153–68. doi: 10.1016/S0169-555X(02)00085-5
- [20] King J, Brown C, Hossein S. A scenario-based holistic approach to environmental flow assessments for rivers. *River Res Appl*. 2003;19:619–39.
- [21] Mathews R, Richter BD. Application of the Indicators of Hydrologic Alteration Software in Environmental Flow Setting1. *JAWRA J Am Water Resour Assoc*. 2007;43:1400–13. doi: 10.1111/j.1752-1688.2007.00099.x
- [22] Peñas FJ, Juanes JA, Galván C, Medina R, Castanedo S, Álvarez C, et al. Estimating minimum environmental flow requirements for well-mixed estuaries in Spain. *Estuar Coast Shelf Sci*. 2013;134:138–49. doi: 10.1016/j.ecss.2013.05.020
- [23] Tharme RE. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Res Appl*. 2003;19:397–441. doi: 10.1002/rra.736
- [24] Gleick P. Water in crisis: paths to sustainable water use. *Ecol Appl*. 1998;8:571–9.
- [25] Tharme R. Review of International Methodologies for the Quantification of the Instream Flow Requirements of Rivers. Water law review final report for policy development for the Department of Water Affairs and Forestry, Pretoria: Freshwater Research Unit, University; 1996.
- [26] Mosley MP. Flow requirements for recreation and wildlife in New Zealand. *J Hydrol*. 1983;22(2):152–74.
- [27] IPCC (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- [28] Francés F, Bussi G. Análisis del impacto del cambio climático en el ciclo de sedimentos de la cuenca del río Esera (España) mediante un modelo hidrológico distribuido. *RIBAGUA*. 2014;1:14–25.
- [29] Alcamo J, Flörke M, Märker M. Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes. *Hydrol Sci*. 2007;37:37–41.
- [30] Van Vuuren DP, Isaac M, Kundzewicz ZW, Arnell N, Barker T, Criqui P, et al. The use of scenarios as the basis for combined assessment of climate change mitigation and adaptation. *Glob Environ Chang*. 2011;21:575–91. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2010.11.003
- [31] Laaser C, Sullivan C. Calculating a Water Poverty Index. *World Dev*. 2002;30:1195–210. doi: 10.1016/S0305-750X(02)00035-9
- [32] Asheesh M. Allocating Gaps of Shared Water Resources (Scarcity Index): Case Study on Palestine-Israel. *Water Resour Middle East*. 2007;2:241–8.
- [33] Jubeh G, Mimi Z. Governance and Climate Vulnerability Index. *Water Resour Manag*. 2012;26:4147–62. doi: 10.1007/s11269-012-0137-7
- [34] Mesa-Jurado MA, Martín-Ortega J, Ruto E, Berbel J. The economic value of guaranteed water supply for irrigation under scarcity conditions. *Agric Water Manag*. 2012;113:10–18. doi: 10.1016/j.agwat.2012.06.009
- [35] Chavez-Jimenez A, Lama B, Garrote L, Martín-Carrasco F, Sordo-Ward A, Mediero L. Characterisation of the Sensitivity of Water Resources Systems to Climate Change. *Water Resour Manag*. 2013;27:4237–4258. doi: 10.1007/s11269-013-0404-2
- [36] Sharma D, Gupta A, Babel M. Spatial disaggregation of bias-corrected GCM precipitation for improved hydrologic simulation: Ping River Basin, Thailand. *Hydrol Earth Syst Sci*. 2007;11:1373–90. doi: 10.5194/hess-11-1373-2007
- [37] Arnell NW. Climate change and global water resources. *Glob Environ Chang*. 1999;9:S31–S49. doi: 10.1016/S0959-3780(99)00017-5
- [38] Vanham M, Millinger S, Pliessnig H, Rauch W. Rasterised Water Demands: Methodology for Their Assessment and Possible Applications. *Water Resour Manag*. 2011;25:3301–20. doi: 10.1007/s11269-011-9857-3
- [39] Garrote L, De Lama B, Martín-Carrasco. Previsiones para España según los últimos estudios de cambio climático. En: Carlos A-URJ (ed.) El cambio climático en España y sus consecuencias en el sect. agua. Madrid: Universidad Rey Juan Carlos, p. 3–15.
- [40] Estrela T, Quintas L. El sistema integrado de modelización precipitación escorrentía (SIMPA). *Rev Ing Civ*. 1996;104:43–52.
- [41] Estrela T, Cabezas F, Estrada F. La Evaluación de los recursos hídricos en el Libro Blanco del Agua en España. 1999;6:125–38.
- [42] Christensen JH, Carter TR, Rummukainen M, Amanatidis G. Evaluating the performance and utility of regional climate models: the PRUDENCE project. *Clim Change*. 2007;81:1–6. doi: 10.1007/s10584-006-9211-6
- [43] Beniston M, Stephenson DB, Christensen OB, Ferro C, Frei C, Goyette S, et al. Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Clim Change*. 2007;81:71–95. doi: 10.1007/s10584-006-9226-z
- [44] Iglesias A, Garrote L, Diz A, Schlickenrieder J, Martín-Carrasco F. Re-thinking water policy priorities in the Mediterranean region in view of climate change. *Environ Sci Policy*. 2011. doi: 10.1016/j.envsci.2011.02.007
- [45] Espadafor M, Lorite JJ, Gavilán P, Berengena J. An analysis of the tendency of reference evapotranspiration estimates and other climate variables during the last 45 years in Southern Spain. *Agric Water Manag*. 2011;98:1045–61. doi: 10.1016/j.agwat.2011.01.015
- [46] González-Zeas D, Quiroga S, Iglesias A, Garrote L. Looking beyond the average agricultural impacts in defining adaptation needs in Europe. *Reg Environ Chang*. 2013. doi: 10.1007/s10113-012-0388-0
- [47] González-Zeas D, Garrote L, Iglesias A, Granados A, Chavez-Jimenez A. Hydrologic determinants of climate change impacts on regulated water resources systems. *Water Resour Manag*. 2015. doi: 10.1007/s11269-015-0920-3

- [48] AEMET (2008) Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España. VV.AA. Agencia Estatal de Meteorología. Ministerio de Medio Ambiente. ISBN:978-84-8320-470-2.
- [49] Karim K, Gubbels M, Coulter I. Review of determination of instream flow requirements with special application to Australia. *Water Resources Bulletin*. 1995;31(6): 1063-1077.
- [50] Arthington AH, Zalucki JM. Comparative evaluation of environmental flow assessment techniques: review of methods. Canberra: Land and Water Resources Research and Development Corporation; 1998.
- [51] MAGRAMA-CHG (2013) Memoria del Plan Hidrológico de la cuenca del Guadalquivir 2009-2015. Madrid, España.
- [52] Dunbar MJ, Gustard A, Acreman M, Elliott RN. Overseas approaches to setting river flow objectives. Environment Agency R&D Technical Report W6B(96)4. Institute of Hydrology. UK: Wallingford, 1997. p. 1-39.
- [53] Andreu J, Capilla J, Sanchis E. AQUATOOL, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management. *J Hydrol*. 1996;177:269–91. doi: 10.1016/0022-1694(95)02963-X
- [54] Martín-Carrasco F, Garrote L, Iglesias A, Mediero L. Diagnosing Causes of Water Scarcity in Complex Water Resources Systems and Identifying Risk Management Actions. *Water Resour Manag*. 2012. doi: 10.1007/s11269-012-0081-6
- [55] Smakhtin V, Revenga C, Döll P. Taking into Account Environmental Water Requirements in Global-scale Water Resources Assessments. Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture Research Report 2. IWMI, Colombo, Sri Lanka. 2004. Assessment p. 1–32.
- [56] García-Vila M, Lorite IJ, Soriano MA, Fereres E. Management trends and responses to water scarcity in an irrigation scheme of Southern Spain. *Agric Water Manag*. 2008;95:458–68. doi: 10.1016/j.agwat.2007.11.009
- [57] González-Zeas D, Garrote L, Iglesias A. Análisis hidrológico de los escenarios de cambio climático en España. *Memoria en Investigaciones en Ingeniería*. 2013;11: 29-41, ISSN 2301 1092. 2013;11:29–41.
- [58] MAGRAMA-CHG. Documento inicial de Evaluación Ambiental Estratégica. Plan hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir. 2008. p. 1–106.
- [59] MAGRAMA-CHG. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente-Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Plan hidrológico del Guadalquivir 2009-2015. 2013. p. 484.
- [60] IPCC. Climate change 2007: Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007. p. 1–104.
- [61] Strosser P, Roussard J, Grandmougin B, Kossida M, Kyriazopoulou I, Berbel J, et al. Final report EU water saving potential (Part 2 – Case Studies). ENV.D.2/ETU/2007/0001r. Berlin: 2007.
- [62] Iglesias A, Garrote L, Flores F, Moneo M. Challenges to Manage the Risk of Water Scarcity and Climate Change in the Mediterranean. *Water Resour Manag*. 2007;21:775–88. doi: 10.1007/s11269-006-9111-6.
- [63] Rodríguez Díaz J, Weatherhead E, Knox J, Camacho E. Climate change impacts on irrigation water requirements in the Guadalquivir river basin in Spain. *Reg Environ Chang*. 2007;7:149–59. doi: 10.1007/s10113-007-0035-3.
- [64] González-Zeas D, Garrote L, Iglesias A. Assessing maximum potential water withdrawal for food production under climate change – an application in Spain. In press. *J. Water Clim. Chang*. 2014.
- [65] Pahl-Wostl C. Transitions towards adaptive management of water facing climate and global change. *Water Resour Manag*. 2007;21:49–62. doi: 10.1007/s11269-006-9040-4
- [66] Garrote L, Iglesias A, Martín-Carrasco F, Mediero L. WAAPA: A model for water availability and climate change adaptation policy analysis, VI EWRA International Symposium, Catania: 2011.
- [67] Vörosarmy C, Green P, Salisbury J, Lammers R. Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth. *Science*. 2000;(80)289:284–8. doi: 10.1126/science.289.5477.284
- [68] Naiman RJ, Bunn SE, Nilsson C, Petts G, Pinat G, Thompson L. Legitimizing fluvial ecosystems as users of water: An overview. *Environ Manage*. 2002;30:455–467. doi: 10.1007/s00267-002-2734-3