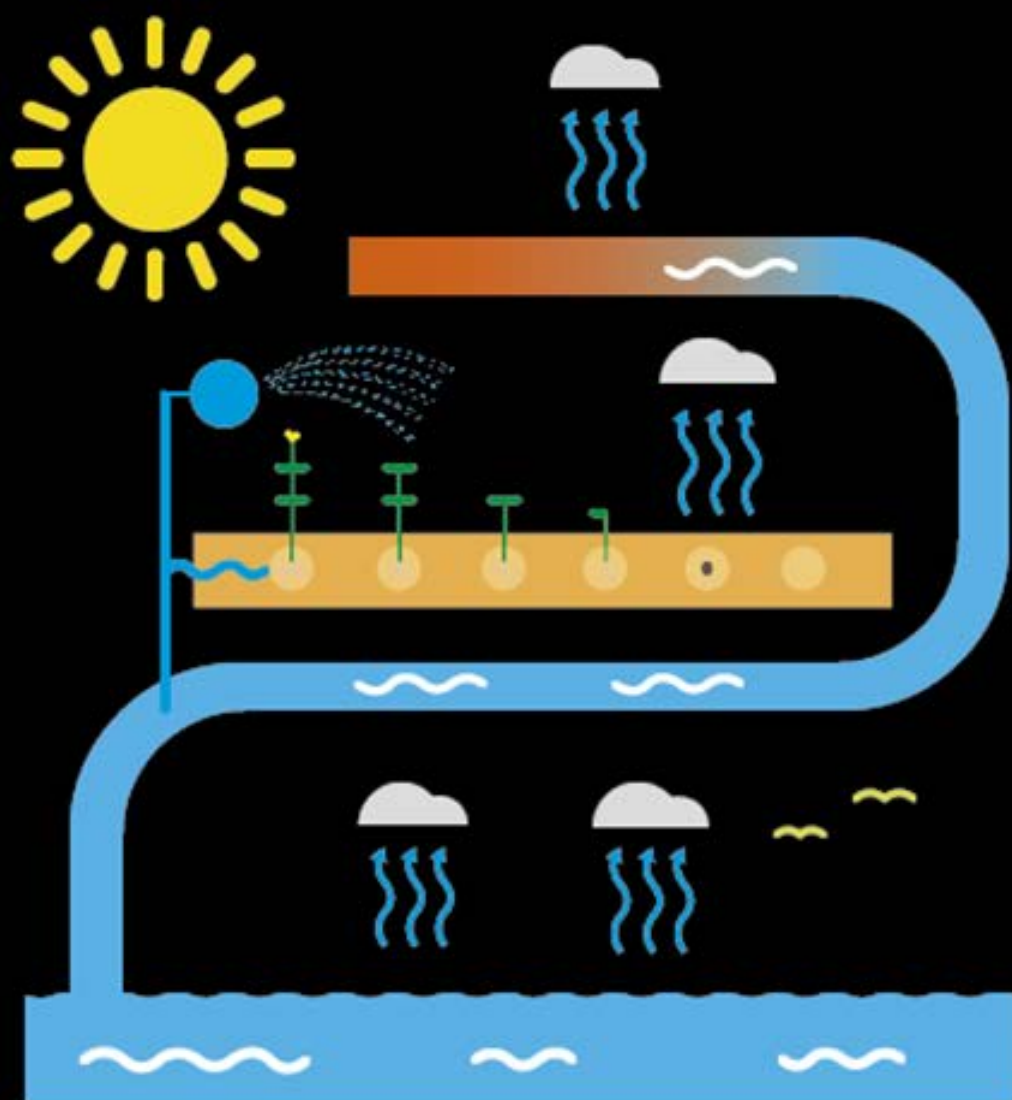


**Economic valuation of water use
for irrigation in the Segura river basin.
Assessment of economic instruments
for aquifer management**

DAVID MARTÍNEZ GRANADOS

PRIMER
PREMIO
2016



David
Martínez
Granados

T
E
S
I
S

D
O
C
T
O
R
A
L



2015



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

DEPARTAMENTO DE ECONOMÍA DE LA EMPRESA

ECONOMIC VALUATION OF WATER USE FOR
IRRIGATION IN THE SEGURA RIVER BASIN.
ASSESSMENT OF ECONOMIC INSTRUMENTS
FOR AQUIFER MANAGEMENT

David Martínez Granados

2015



Universidad
Politécnica
de Cartagena

Campus
de Excelencia
Internacional



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

**DEPARTAMENTO DE ECONOMÍA DE LA EMPRESA
ÁREA DE ECONOMÍA, SOCIOLOGÍA Y POLÍTICA AGRARIA**

**ECONOMIC VALUATION OF WATER USE FOR
IRRIGATION IN THE SEGURA RIVER BASIN.
ASSESSMENT OF ECONOMIC INSTRUMENTS
FOR AQUIFER MANAGEMENT**

David Martínez Granados

2015



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

**DEPARTAMENTO DE ECONOMÍA DE LA EMPRESA
ÁREA DE ECONOMÍA, SOCIOLOGÍA Y POLÍTICA AGRARIA**

ECONOMIC VALUATION OF WATER USE FOR IRRIGATION IN THE SEGURA RIVER BASIN. ASSESSMENT OF ECONOMIC INSTRUMENTS FOR AQUIFER MANAGEMENT

David Martínez Granados

Directores:

Dr. Javier Calatrava Leyva

Dr. Victoriano Martínez Álvarez

2015

A mi madre, padre,
abuelas, abuelos, Khuyay
y demás familia y amigos.

Esta memoria se presenta en la modalidad de compendio de publicaciones.

Los artículos que constituyen la tesis son los siguientes:

1. **Publication 1: Martínez-Granados, D.**, Maestre-Valero, J.F., Calatrava, J. y Martínez-Álvarez, V. (2011). "The economic impact of water evaporation losses from water reservoirs in the Segura basin, SE Spain". *Water Resources Management*, 25(13): 3153–3175.
2. **Publication 2: Maestre-Valero, J.F., Martínez-Granados, D.**, Martínez-Álvarez, V. y Calatrava, J. (2013). "Socio-economic impact of evaporation losses from reservoirs under past, current and future water availability scenarios in the semi-arid Segura basin". *Water Resources Management*, 27(5): 1411–1426.
3. **Publication 3: Martínez-Granados, D.** y Calatrava J. (2014). "The role of desalinisation to address aquifer overdraft in SE Spain". *Journal of Environmental Management*, 144: 247–257.

Agradecimientos

Personales

En primer lugar quiero agradecer, como no podría ser de otro modo, a mis directores de tesis los Drs. Javier Calatrava Leyva y Victoriano Martínez Álvarez, por haber hecho posible el desarrollo de mi trabajo de investigación. Por vuestra enorme paciencia, comprensión, apoyo, profesionalidad y por haberme transmitido parte de vuestros conocimientos.

En especial agradecer a Javier Calatrava Leyva por toda la ayuda que me ha brindado y los buenos momentos que hemos pasado a lo largo de todos estos años, por ser un modelo a seguir y al que considero mi amigo.

A todos los miembros del área de economía, sociología y política agraria, CU. María Dolores de Miguel Gómez, Dr. Narciso Arcas Lario, Dr. Francisco José Alcón Provencio y en especial al profesor Juan Molero Ramis por sus buenos consejos.

Al Dr. Pedro Segura del CEBAS-CESIC por su colaboración en IRRIQUAL.

A todos mis compañeros de doctorado, por su compañerismo y por lo fácil que ha sido trabajar con ellos, en especial a José Francisco Maestre Valero, Raquel Valdés Illán, Erasmo Isidro López Becerra y Melisa Gómez Garrido.

A mi madre y a mi padre por su capacidad de sacrificio para poder darnos a mi hermana y a mí todo lo que ha estado en sus manos, sin pedir nada a cambio, y sin los que no hubiera podido desarrollar mi carrera profesional. Sé que no os podré devolver ni una ínfima parte de lo que me disteis. En especial quiero agradecerme a ti mamá, por tener siempre fe en mí, por tus buenos consejos (los mejores), por tu forma de cocinar, por mirar siempre al frente sin miedo al futuro, por los valores que me has transmitido que me han formado como ser humano y en general por ser la mejor madre del mundo y la mejor persona que he conocido en mi vida.

A mi hermana Silvia, con la que comparto algo más que la sangre, por estar siempre ahí, por las risas y por todos los momentos divertidos que pasamos juntos cuando éramos pequeños, que sabes que son muchos. También quiero agradecer a Manuel, mi cuñado, por el sacrificio que está haciendo junto a mi hermana para criar a una niña maravillosa, mi sobrina Azahara, que ha traído la felicidad a la familia.

A mi tía Matilde y a mi tío Juan, por todo el amor que me han dado, por ser tan buenas personas y por todos los bonitos veranos que hemos pasado juntos. Tita siempre has sido como una segunda madre para mí.

A mi familia en general, tías, tíos, primas y primos, por su apoyo y ayuda.

A mis amigos de toda la vida, Francisco Miguel, Domingo, Paula, Raúl, Dimas, Antonio, Patricio, David, Paco, por los buenos momentos que hemos pasado juntos y por las noches en el Jardín. Y a mis compañeros de Tragsatec José Alberto y Jorge.

A mis compañeros de piso Luis, Marcos y Neo, por vuestra compañía y por hacerme desconectar del día a día. Y a todos los amigos de los años de universidad.

A Catalina, por hacerme menos agreste aquel invierno en Albacete y por enseñarme tantas cosas interesantes.

Y por último, pero no por ello menos importante, quería agradecerte a ti Nieves, por haber estado siempre ahí, por dejarme compartir parte de mi vida contigo y por aguantarme con tu infinita paciencia.

Además quiero agradecer a la ciudad de Cartagena, que tantas cosas buenas me ha dado, a pesar del salitre y la humedad. A Archena, ese plácido lugar del Valle de Ricote en el que crecí. Y a Válor, ese paraíso en Las Alpujarras, en el que no tuve la fortuna de nacer, pero en el que, cuando tenga que hacerlo, me gustaría morir.

Institucionales

Al proyecto europeo “Sustainable Orchard Irrigation for improving fruit Quality and Safety” (IRRIQUAL) y al proyecto “Efectos Ambientales y Económicos del Uso de los Recursos Naturales Suelo y Agua en el Sector Agrario” (NATAG) (Referencia RTA 2010-00109-C04-03. Programa sectorial de Recursos y Tecnologías Agrarias, Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria INIA), por la concesión de la beca de Iniciación asociada a actividades de I+D+I y el contrato laboral que han hecho posible, económicamente, la realización de esta tesis.

A la Fundación Botín y su Observatorio del Agua por concederme el Premio al Talento Joven para la Gestión sostenible del Agua en su modalidad B. Modelos de gestión que permitan un ahorro de agua, mejoren su gestión, aumenten la productividad eco-social o contribuyan a su mejor conservación por la publicación “The role of desalination to address aquifer overdraft in SE Spain”

Índice

Resumen	1
Abstract	5
Capítulo I. Introducción y objetivos	9
Capítulo II. Antecedentes y estado del arte.....	15
II.1. Descripción de las zonas de estudio	15
II.1.1. La cuenca del Segura	15
II.1.2. Balance hídrico de la cuenca del Segura	17
II.1.3. La cuenca del Guadalentín.....	19
II.1.4. Balance hídrico de la cuenca del Guadalentín.....	21
II.2. Técnicas para estimar la evaporación en balsas de riego y grandes embalses	25
II.3. Evaluación de las pérdidas por evaporación	28
II.4. Valoración económica del agua de riego.....	29
II.5. Uso de instrumentos económicos para la gestión de acuíferos.	32
Capítulo III. Publicación 1	37
III.1. Resumen de la publicación	37
III.2. Copia de la publicación	49
Capítulo IV. Publicación 2.....	85
IV.1. Resumen de la publicación.....	85
IV.2. Copia de la publicación.....	95
Capítulo V. Publicación 3.....	121
V.1. Resumen de la publicación.....	121
V.2. Copia de la publicación.....	131
Capítulo VI. Conclusiones.....	163
Capítulo VII. Referencias	167
Apéndice I. Índice de impacto de las publicaciones	177

Índice de tablas

Tabla II.1. Balance hídrico de la cuenca del Segura.....	18
Tabla II.2. Superficie y demanda de agua de las UDAs del Valle del Guadalentín.	22
Tabla II.3. Derechos de agua y concesiones disponibles en las UDAs del Valle del Guadalentín (hm ³ /año).....	22
Tabla II.4. Recursos de agua disponibles actualmente en las UDAs del Valle del Guadalentín y bombeos de recursos subterráneos no renovables (hm ³ /año).	23
Tabla IV.1. Disponibilidad de agua y pérdidas por evaporación para los escenarios de disponibilidad de agua propuestos (SC1 a SC5) y situaciones de evaporación (A, B y C) en la cuenca del Segura.	91
Tabla IV.2. Impactos económicos de las pérdidas por evaporación de agua en balsas de riego, grandes embalses y totales para los escenarios propuestos de disponibilidad de agua en la cuenca del Segura.....	92

Índice de figura

Figura II.1. Localización de la cuenca del Segura en el sureste de España.	15
Figura II.2. Ámbito territorial de la cuenca del Segura.....	16
Figura II.3. Ámbito territorial y localización de la cuenca del Guadalentín en la cuenca del Segura.....	20
Figura IV.1. UDAs del Valle del Guadalentín.....	21
Figura IV.2. Acuíferos del Valle del Guadalentín.....	25

Resumen

El regadío es un factor clave para la producción agraria en zonas con climas semiáridos, como es el caso de la cuenca del Segura, en el sureste de España, donde la escasez de agua para riego es especialmente severa. La fuerte demanda de agua para la producción de cultivos hortofrutícolas de elevada rentabilidad, junto a un notable crecimiento de la población y el turismo, han generado una importante presión sobre los recursos hídricos, exacerbando la tradicional situación de escasez de la cuenca. Además, los escenarios de cambio climático previstos pueden empeorar esta situación en el futuro.

En este contexto de creciente escasez y sensibilización hacia la conservación de los recursos hídricos y los ecosistemas dependientes de los mismos, se hace necesario evaluar posibles alternativas de gestión de los recursos hídricos, lo que implica conocer, no solo la efectividad de dichas medidas, sino también su impacto económico, para lo que resulta esencial una adecuada valoración económica de los usos del agua.

Las particulares características agronómicas, tecnológicas y económicas de los sistemas productivos de regadío de la cuenca del Segura, junto con su situación de escasez estructural de agua, hacen que la gestión de los recursos hídricos en esta zona sea especialmente compleja y, en ocasiones, conflictiva. Esta tesis doctoral, fundamentada en tres artículos científicos, aborda varias problemáticas de gestión del agua con gran relevancia económica, social y ambiental.

En el primer artículo se evalúa el impacto económico de las pérdidas por evaporación de agua en grandes embalses y pequeñas balsas de riego de la cuenca del Segura. En climas semiáridos, estas pérdidas pueden ser elevadas, reduciendo el elevado nivel de eficiencia en el uso del agua que se ha alcanzado mediante técnicas como la presurización de los sistemas tradicionales de transporte y distribución o el riego localizado, por lo que pueden tener un impacto económico significativo. El volumen de pérdidas de agua por evaporación se ha calculado mediante una metodología basada en registros de evaporación en tanque evaporímetro Clase-A y coeficientes de tanque mensuales. A partir de dicha estimación, se ha calculado el impacto económico de dichas pérdidas utilizando un modelo económico de programación matemática que simula la asignación de la superficie regable y los recursos hídricos disponibles entre los cultivos de las diferentes zonas regables de la cuenca. Dicho modelo permite obtener el valor de uso del agua de riego en la cuenca del Segura, así como analizar el impacto económico de diferentes escenarios de disponibilidad de agua. En este caso, se ha utilizado para evaluar el impacto económico de las pérdidas por evaporación.

Los resultados obtenidos muestran una elevada rentabilidad del agua en la cuenca, si bien existen notables diferencias entre zonas. Las pérdidas por evaporación de agua de los embalses y pequeñas balsas de riego suponen una reducción del 6,3% del valor de la producción agraria de la cuenca y del 5,4% de la rentabilidad privada, medida en términos de margen neto de las explotaciones. Este impacto es mayor, tanto en términos absolutos como relativos, en las zonas de la cuenca que alojan los regadíos más intensivos y rentables. Aproximadamente un 80% del impacto económico corresponde a la evaporación desde pequeñas balsas de riego. Nuestros resultados ponen de manifiesto la necesidad de tener en cuenta las pérdidas por evaporación en la gestión del agua ya que tienen importantes impactos hidrológicos y económicos. La cuantificación de dichos impactos permite realizar una valoración económica más exacta del uso agrario del agua en la cuenca y de las implicaciones de posibles alternativas de gestión. La metodología utilizada y los resultados obtenidos son por tanto de utilidad para la planificación y la gestión de los recursos hídricos, incluyendo la evaluación de alternativas para reducir las pérdidas por evaporación.

En el segundo artículo, se evalúa el impacto económico de las pérdidas por evaporación en grandes embalses y pequeñas balsas de riego de la cuenca del Segura bajo diferentes escenarios definidos en función de las tendencias de la política hidráulica y las predicciones de cambio climático. La evaluación de las pérdidas por evaporación bajo diferentes escenarios climáticos e hidrológicos se realiza combinando modelos de balance energético del tanque evaporímetro Clase-A, que incorporan el efecto de las variaciones climáticas, con coeficientes de tanque mensuales. A continuación, se utiliza una versión más completa del modelo económico empleado en el primer artículo para evaluar el impacto social y económico de dichas pérdidas por evaporación, analizando la evolución del impacto en el regadío de la cuenca bajo los distintos escenarios de escasez creciente considerados.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la disponibilidad de agua en la cuenca podría reducirse hasta en un 40% en el escenario más desfavorable, con un impacto económico de entre el 32 y 36%, según el indicador que se considere. Las pérdidas anuales por evaporación oscilan entre el 6,5% y el 11,7% de los recursos hídricos disponibles para el riego en la cuenca. La progresiva reducción en la disponibilidad de agua en los escenarios considerados tiene importantes y crecientes impactos económicos sobre el regadío de la cuenca. Según el escenario considerado, este impacto de las pérdidas por evaporación oscila entre el 4,3% y el 12,3% del valor de la producción agraria, entre el 4,0% y el 12,0% del margen neto de las explotaciones, entre el 5,8% y el 10,7% de la superficie regada y entre el 5,4% y el 13,5% del empleo agrario.

Estos resultados ponen de manifiesto el creciente efecto del cambio climático sobre las pérdidas por evaporación de agua en la cuenca del Segura, y la necesidad de tener en cuenta las pérdidas por evaporación para la gestión y planificación de los recursos hídricos, tanto en la situación actual como en las futuras.

En el tercer y último artículo, se analiza el impacto económico de diferentes instrumentos de gestión del agua que pueden utilizarse para eliminar la sobreexplotación en los acuíferos de la cuenca del Guadalentín, uno de los casos más graves de degradación de aguas subterráneas de la cuenca del Segura y de Europa, prestando especial atención al papel que puede jugar la nueva disponibilidad de agua desalinizada. En esta zona, el crecimiento de la disponibilidad de recursos procedentes de la desalinización supone una oportunidad para abordar este problema a un menor coste económico y social. Los instrumentos analizados son, aparte de la prohibición de las extracciones sin compensación alguna, una tasa ambiental sobre los bombeos de aguas subterráneas, la compra de derechos de aguas subterráneas por parte de la Administración, y la subvención del precio del agua desalinizada a cambio de reducir las extracciones de los acuíferos. Su impacto se evalúa mediante un segundo modelo de programación matemática que maximiza el margen neto derivado de utilizar las diferentes fuentes de suministro de agua disponibles para el regadío en la zona. Este modelo se alimenta de los resultados generados para la zona de estudio por el modelo utilizado en el artículo previo, permitiendo calcular tanto la eficacia de cada instrumento en la consecución del objetivo de reducción de las extracciones de agua subterránea como su impacto económico.

En cuanto a la evaluación de instrumentos para eliminar la sobreexplotación de acuíferos, los resultados obtenidos muestran cómo, en la situación actual de disponibilidad de recursos hídricos, todas las alternativas tienen impactos económicos significativos sobre el sector agrario. La mayor disponibilidad en el futuro, aunque a un mayor precio, de recursos procedentes de la desalinización reduciría dichos impactos, aunque no los eliminaría totalmente. Es más, la demanda de agua es tan elevada en la zona que incluso subvencionando fuertemente el precio del agua marina desalinizada a cambio de reducir el uso de agua subterránea no se eliminaría la sobreexplotación. Elegir entre las diferentes medidas analizadas dependerá por tanto de la importancia que se dé a su impacto sobre el sector agrario frente a su coste presupuestario.

Abstract

Irrigation is a key factor for agricultural production in areas with semi-arid climates, such as the Segura River basin in SE Spain, where water scarcity for irrigation is especially severe. The high water demand for the production of highly profitable horticultural crops, together with a notable increase in population and tourism, has created strong pressures on water resources, exacerbating the basin's traditional water scarcity situation. In addition, the predicted climate change scenarios can worsen this situation in the foreseen future. In this context of increasing scarcity and concern about the conservation of water resources and aquatic ecosystems, it is necessary to evaluate possible water management alternatives. This implies assessing, not only the effectiveness of potential management measures, but also its economic impact, what requires an adequate economic valuation of water uses.

The particular agronomic, technological and economic characteristics of the irrigated agricultural systems in the Segura basin, together with its structural water scarcity situation, make water resources management in this area especially complex and occasionally conflictive. This dissertation, founded on three scientific papers, addresses several relevant water management problems of high economic, social and environmental relevance.

On the first paper we assess the economic impact of evaporation losses from great dams (GDs) and on-farm agricultural water reservoirs (AWRs) in the Segura River basin. In semi-arid climates, these losses can be significant, thus reducing the high water use efficiency reached in agriculture by means of other techniques such as irrigation schemes pressurisation or drip irrigation systems and, consequently, may have a substantial economic impact. Evaporation losses have been calculated using Class-A pan evaporimeter data and monthly pan coefficients. Considering the estimated evaporation losses, we assess the economic impact of such losses using an economic mathematical programming model that simulates land and water allocation to crops in the different irrigated areas of the basin. This model allows computing the use value of water in the irrigated agriculture of the Segura basin, as well as analysing the economic impact of different scenarios of water availability. In the present study, it is used to assess the economic impact of evaporation losses form reservoirs.

Results show a high profitability of water use in the basin, with marked differences between areas. We estimate the economic impact of annual evaporation from GDs and AWRs in a reduction of 6.3% of the value of agricultural production and 5.4% of the farm net margin. This impact is greater, in both absolute and relative terms, in the areas

accommodating the most intensive and profitable irrigated agriculture. Approximately 80% of such impact corresponds to evaporation from AWRs. Our results highlight the need to account for evaporation losses in water management, as they have important economic impacts. The quantitative assessment of such impacts allows for a more accurate economic valuation of agricultural water use in the basin and of the implications of possible water management alternatives. The applied methodology and results could therefore be useful for future water planning and management, including the assessment of measures for reducing evaporation from reservoirs.

The second paper assesses evaporation losses from water reservoirs in the semi-arid Segura basin from both the hydrologic and economic perspectives under different water availability scenarios that are defined based on water policy trends and climate change prospects. Evaporation losses under different climatic and hydrologic scenarios are evaluated with a combination of energy balance models for a Class-A pan evaporimeter, which incorporates the effect of climatic variations, and monthly pan coefficients. A more complete version of the economic mathematical programming model used in the previous article is used to assess the social and economic impact of such evaporation losses under the considered forthcoming scenarios on the basin irrigated agriculture.

Our results indicate that water availability could be reduced by up to 40% in the worst-case scenario, with an economic impact in the 32–36% range, depending on the indicator in question. The total annual evaporation loss from reservoirs ranges from 6.5% to 11.7% of the water resources available for irrigation in the basin. The economic impact of such evaporation losses increases with water scarcity, ranging from 4.3% to 12.3% of the value of agricultural production, 4.0% to 12.0% of net margin, 5.8% to 10.7% of the irrigated area, and 5.4% to 13.5% of agricultural employment. These results illustrate the importance of evaporation losses from reservoirs in this region, its marked upward trend for forthcoming scenarios, and the need to account for such losses in future water planning and management.

In the third and last paper, we analyse the economic impact of alternative water management instruments that can be used to address the problem of non-renewable groundwater pumping in the aquifers of the Guadalentín basin, one of the most severe cases of aquifer degradation in the Segura basin and in Europe, including the role that new desalinated resources can play. In some areas, availability of desalinated seawater resources is being expanding, what provides an opportunity to address this problem at a lower social and economic cost. The considered instruments are, apart from the outright prohibition of groundwater pumping, an environmental tax on groundwater use,

the public buyback of groundwater rights, and the subsidisation of desalinated resources in exchange for reducing extractions from the aquifers. Their impact is assessed using a second mathematical programming model that maximises the farm net margin resulting from the use of the available water resources for irrigation in the area. This model is fed from the results generated by the model used in the second paper for the area of study and calculates the effectiveness of each instrument to achieve the objective of reducing aquifer pumping as well as its economic impact.

Our results show that, in the current situation of water availability, all the considered alternatives have significant economic impacts on irrigated agriculture. The existence of abundant, though expensive, desalinated water resources in the foreseen future would reduce, but not eliminate, the negative economic impact of such instruments. Furthermore, water demand is so high in this area that even strongly subsidising the price of desalinated water in exchange for reducing the use of groundwater would not allow eliminating aquifer overdraft. Choosing the right measure thus depends on the relative weights given to the impact on the agricultural sector and to the public cost of the measure.

Capítulo I. Introducción y objetivos

El desarrollo económico, el crecimiento demográfico y, muy especialmente, la expansión de la agricultura de regadío han causado un gran aumento de la demanda de agua en las cuencas mediterráneas. Como resultado se han incrementado notablemente las extracciones del sistema hidrológico, llegando incluso a superar la disponibilidad de recursos hídricos en algunas regiones (Iglesias *et al.* 2007). Además, las predicciones de cambio climático en Europa contemplan un aumento del estrés hídrico en los países mediterráneos, circunstancia por la que probablemente estos desequilibrios se acentúen en un futuro próximo (IPCC, 2007; IPCC, 2008). Ante esta situación y perspectiva, el desarrollo y la aplicación del conocimiento científico sobre la gestión sostenible de recursos hídricos son de suma importancia para los países del ámbito mediterráneo (Christodoulou, 2011).

El regadío es un factor clave para la producción agraria en muchas zonas de España, especialmente en aquellas con climas semiáridos, como es el caso de la cuenca del Segura, donde la escasez de agua para riego es especialmente severa pese a recibir recursos externos del Tajo a través del Acueducto Tajo-Segura (ATS). En esta cuenca, las reducidas precipitaciones se combinan con una fuerte demanda de agua para la producción de cultivos hortofrutícolas de elevada rentabilidad, así como con un notable crecimiento de la población y del sector turístico. La expansión de la agricultura de regadío en los últimos treinta y cinco años, durante los cuales la superficie de regadío se ha multiplicado por dos, ha generado una importante presión sobre los recursos hídricos, exacerbando la tradicional situación de escasez de la cuenca y ocasionando un importante problema de sobreexplotación en muchos acuíferos. Además las previsiones asociadas al cambio climático sugieren que la disponibilidad de agua disminuirá hasta en un 16% en el escenario de 2030 (MIMAM, 2000) y hasta en un 28% en el escenario de 2060 (Moreno *et al.*, 2005), ambas cifras en comparación con el escenario de referencia en la cuenca.

En este contexto de creciente escasez, al que hay que añadir el mayor grado de sensibilización hacia la conservación de los recursos hídricos y de los ecosistemas acuáticos dependientes de los mismos, el reparto del agua genera importantes conflictos entre diferentes usuarios y administraciones autonómicas, conflictos que se agravan durante los frecuentes episodios periódicos de sequía. Por tanto se hace necesario proponer y evaluar posibles alternativas de gestión de los recursos hídricos que

permitan una adaptación progresiva a la futura disponibilidad de recursos hídricos, minimizando su impacto económico y garantizando la sostenibilidad ambiental. La evaluación económica debe focalizarse en el sector de la agricultura de regadío, dado que consume más del 80% de los recursos disponibles en la cuenca, es uno de los soportes socioeconómicos de la región, y es especialmente vulnerable a la escasez de agua. Las particulares características agronómicas, tecnológicas y económicas de los sistemas productivos de regadío de la cuenca del Segura hacen que la modelización de su comportamiento económico sea especialmente compleja, por lo que su aplicación para la evaluación económica de escenarios alternativos de gestión y disponibilidad de agua es un reto de notable interés tanto técnico como científico.

En este trabajo se abordan dos cuestiones de notable relevancia económica, social y ambiental. La primera se refiere a las pérdidas por evaporación de agua en pequeñas balsas de riego y grandes embalses de la cuenca del Segura, mientras que la segunda es la sobreexplotación de los acuíferos.

Las pérdidas por evaporación en balsas y grandes embalses pueden ser elevadas en climas áridos y semiáridos, reduciendo el elevado nivel de eficiencia en el uso del agua alcanzado en el regadío mediante técnicas como la presurización de los sistemas tradicionales de transporte y distribución o el riego localizado. Un paso previo imprescindible para evaluar posibles alternativas que minimicen este problema es la adecuada evaluación económica de las pérdidas por evaporación, circunstancia que además pondrá de relevancia la magnitud de su impacto económico.

El problema de las pérdidas por evaporación en balsas de riego es especialmente representativo de la cuenca del Segura, donde la proliferación de estas infraestructuras agrarias ha aumentado conforme se acentuaban los problemas de escasez de agua. Las pequeñas balsas de riego proporcionan a los agricultores una mayor capacidad de regulación, lo que les permite hacer frente a la baja garantía de suministro y mezclar aguas de distinto origen y calidad. Sin embargo, frente a estas ventajas para el manejo del riego, adolecen de sufrir grandes pérdidas por evaporación debido a su elevada relación superficie-profundidad. Si bien son numerosos los trabajos que estiman las pérdidas por evaporación en grandes embalses, solo unos pocos autores lo han hecho para pequeñas balsas de riego, concluyendo que las pérdidas por evaporación en éstas últimas están lejos de ser insignificantes. También hay que tener en cuenta que las predicciones de cambio climático auguran un incremento potencial de la evaporación desde las masas de agua (Schindler y Donahue, 2006; Jurak, 1989), por lo que resulta necesario plantear alternativas que permitan controlar estas pérdidas.

Tampoco se han encontrado estudios significativos hasta la fecha que evalúen el impacto de las pérdidas por evaporación en los grandes embalses y en las balsas de riego desde una perspectiva económica y a escala de cuenca, y mucho menos considerando futuros escenarios climáticos y de disponibilidad de agua, lo que pone de relevancia el interés y la novedad de este estudio.

La segunda problemática abordada en esta tesis es la de la sobreexplotación de acuíferos en la cuenca del Segura como consecuencia de la expansión de la agricultura de regadío en las últimas décadas. La explotación no sostenible de los recursos subterráneos es actualmente uno de los principales problemas medioambientales y de gestión del agua en el sureste de España. Tiene además una especial relevancia social y económica debido a la importancia estratégica de las aguas subterráneas para el sector agrario de la cuenca, uno de los más productivos y rentables de Europa. Como ejemplo representativo, en algunos acuíferos de la cuenca del Segura los bombeos no renovables representan entre un tercio y la mitad del uso total de agua en el regadío.

Frente a esta situación generalizada de sobreexplotación en los acuíferos, el cumplimiento de los objetivos medioambientales establecidos en los planes hidrológicos de cuenca para las masas de agua, en concordancia con la Directiva Marco del Agua (EC, 2000), requiere de la implementación de un conjunto específico de medidas o instrumentos económicos. La selección de las medidas a utilizar requiere una evaluación tanto de su potencial para el logro de los objetivos medioambientales como del impacto económico de su aplicación.

El problema de sobreexplotación en los acuíferos es de especial gravedad en la cuenca del Guadalentín, zona de estudio seleccionada en este trabajo. La importancia de los recursos subterráneos para la economía del regadío de esta zona hace que la solución a este problema tenga importantes impactos económicos y resulte, por tanto, potencialmente muy conflictiva. Existe una abundante literatura a nivel internacional que analiza la efectividad y el impacto de instrumentos de gestión de acuíferos como la restricción de las extracciones, la tarificación del agua, la compensación económica por reducir el consumo, la compra de derechos de aguas subterráneas, los mercados de agua, la cooperación entre usuarios, etc. En el caso de España, los instrumentos más utilizados para reducir las extracciones de los acuíferos no se han basado en el establecimiento de precios o mercados de agua, sino en la restricción de extracciones mediante el establecimiento de cuotas, los pagos por reducir el consumo y la compra de derechos (Iglesias, 2002; Carmona *et al.*, 2011), obteniendo generalmente poco éxito. En este trabajo se analiza la posibilidad de que, a diferencia de otras zonas de España

donde se han aplicado instrumentos de gestión, la posible incorporación de agua marina desalinizada, incrementa la eficacia y reduce el impacto de los instrumentos considerados.

En la práctica, el uso de recursos desalinizados puede no suponer una alternativa efectiva para reducir la sobreexplotación de los acuíferos, debido a que el coste para los usuarios de estos recursos es muy superior al de los subterráneos. Por tanto es poco probable que los agricultores sustituyan el agua subterránea por un recurso más caro sin tener ningún incentivo para hacerlo. Para superar esta limitación, se plantea en este estudio una hipotética subvención al precio del agua desalinizada a cambio de reducir las extracciones, propuesta que se evaluará frente a otros instrumentos, como la prohibición de los bombeos no renovables sin ningún tipo de compensación, una tasa ambiental a las extracciones o la compra pública de derechos de agua subterránea.

En concordancia con los problemas expuestos en esta introducción, los principales objetivos de esta tesis son:

- 1) Evaluar el impacto económico de las pérdidas por evaporación en pequeñas balsas de riego y grandes embalses de la cuenca del Segura, tanto en el escenario actual de disponibilidad de recursos hídricos como en escenarios de disponibilidad basados en las predicciones de cambio climático.
- 2) Analizar el impacto económico de diferentes instrumentos de gestión que pueden utilizarse para eliminar la sobreexplotación de acuíferos en la cuenca del Segura, incluyendo la nueva disponibilidad de recursos procedentes de la desalinización.

Para la consecución de estos objetivos principales resulta necesario establecer una serie de objetivos secundarios:

- Establecer escenarios realistas de disponibilidad de agua, tanto presentes como futuros, en base a los datos actuales y las predicciones asociadas al cambio climático.
- Definir una metodología para evaluar el volumen de las pérdidas de agua por evaporación en pequeñas balsas de riego y grandes embalses de la cuenca del Segura, aplicable a los diferentes escenarios considerados.

- Desarrollar un modelo para la valoración económica del agua utilizada en el regadío de la cuenca del Segura, aplicable bajo distintos escenarios de disponibilidad de agua.
- Modelizar la respuesta de los regantes a cada uno de los instrumentos de gestión de acuíferos que se propongan, así como su impacto económico.

La metodología desarrollada en este trabajo aporta varias contribuciones originales. En primer lugar, se cuantifican las pérdidas por evaporación de las masas de agua en la cuenca del Segura, así como el impacto creciente del cambio climático sobre las mismas. En segundo lugar, se desarrolla un modelo de programación no lineal que permite obtener el valor de uso del agua de riego en la cuenca del Segura, y que permite analizar el impacto económico y social de diferentes escenarios de disponibilidad de agua. Finalmente, se desarrolla un segundo modelo de programación matemática para analizar el impacto económico de instrumentos de gestión para eliminar la sobreexplotación de los acuíferos.

Este documento se estructura en siete capítulos y un apéndice. A continuación de esta introducción, en el capítulo II, se exponen los antecedentes y estado del arte del trabajo, incluyendo la descripción de las zonas de estudio y la revisión de la literatura sobre los diferentes aspectos abordados en la tesis. Los siguientes capítulos (III, IV y V) presentan los resúmenes en castellano de cada una de las tres publicaciones que conforman esta tesis doctoral, que se presenta como compendio de publicaciones, así como la versión original de dichos artículos en inglés. En el capítulo VI se presentan las conclusiones de la tesis, mientras que en el capítulo VII se recoge la bibliografía citada a lo largo del documento. Finalmente, se incluyen un apéndice formalmente necesario donde se informa acerca de los índices de impacto de las tres publicaciones.

Capítulo II. Antecedentes y estado del arte

II.1. Descripción de las zonas de estudio

II.1.1. La cuenca del Segura

La cuenca del Segura, situada en el sureste de la Península Ibérica (Figura II.1), cubre un área de 18.870 km² (3,7% de la extensión total del territorio de España) y abarca las comunidades autónomas de la Región de Murcia, Andalucía (provincias de Jaén, Granada y Almería), Castilla-La Mancha (provincia de Albacete) y Comunidad Valenciana (provincia de Alicante) (Figura II.2). De estas cuatro comunidades, es la Región de Murcia la que más superficie ocupa dentro de la cuenca, con un 59,1% del total, seguida de Castilla-La Mancha con un 25,0%, Andalucía con un 9,4% y la Comunidad Valenciana con un 6,5%. Su población en 2010 era de aproximadamente 2 millones de habitantes, el 4,1% de la población española, con una marcada tendencia al alza.

Figura II.1. Localización de la cuenca del Segura en el sureste de España.

Fuente Elaboración propia.

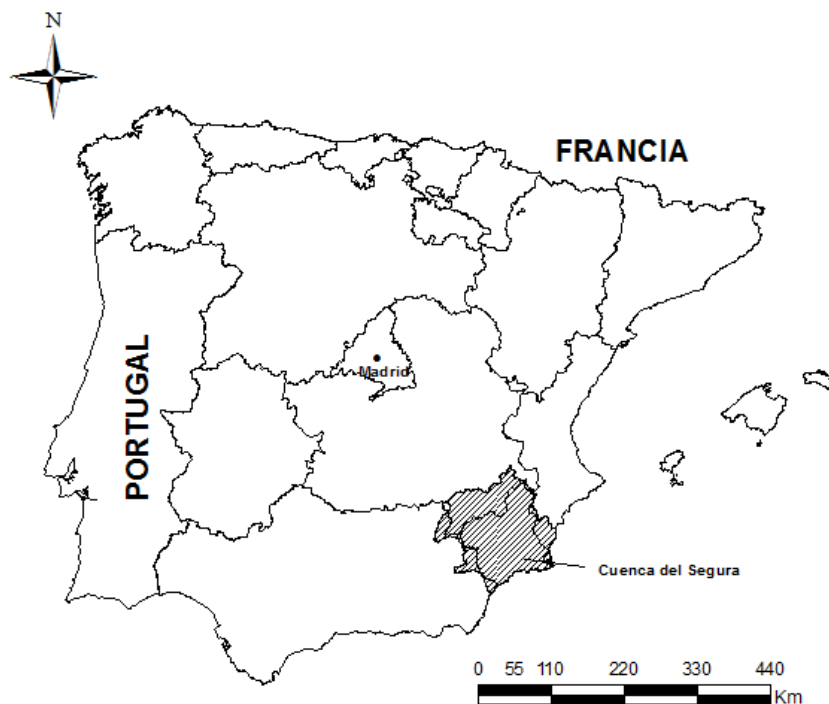
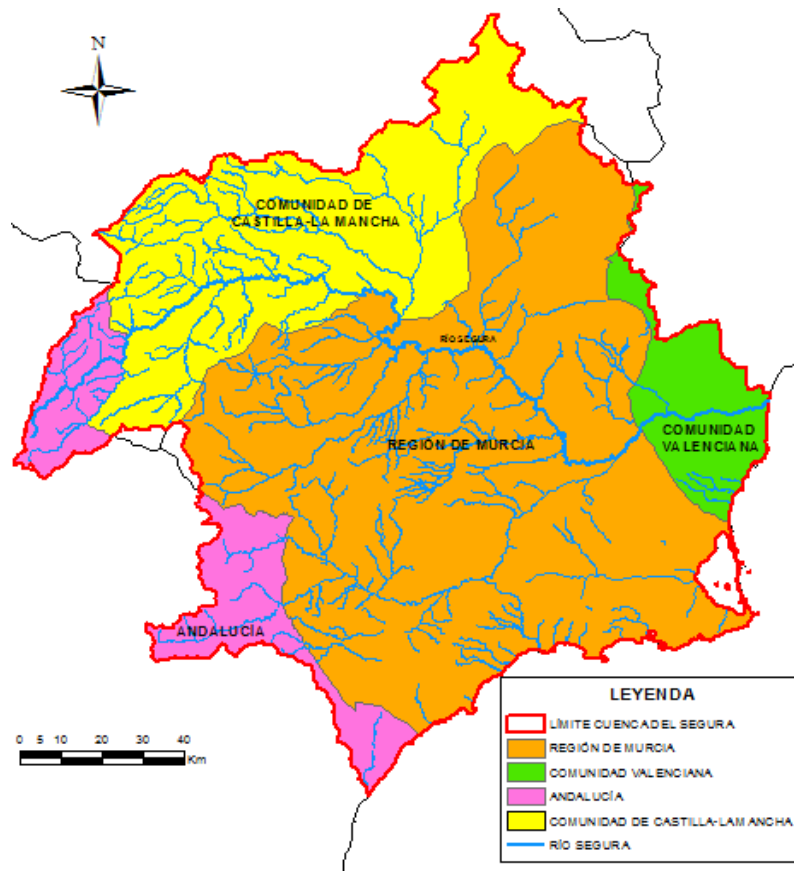


Figura II.2. Ámbito territorial de la cuenca del Segura. Fuente: Elaboración propia.



El relieve de la cuenca presenta gran variabilidad, abarcando desde zonas montañosas de la cabecera en la Sierra del Segura, con cotas máximas por encima de los 2000 m, llanuras litorales, extensas altiplanicies, amplios valles y llanuras fluviales. La mayoría de los recursos superficiales provienen de la cabecera de la cuenca a través del río Segura, el único río principal de la cuenca, mientras que los afluentes de la margen derecha (Moratalla, Argos, Quípar, Mula y Guadalentín) son ríos que tienen poco caudal (CHS, 2007). En la margen izquierda, con la excepción del río Mundo, predominan las ramblas con caudales discontinuos, escasos y generalmente torrenciales. Una parte importante de los recursos hídricos de la cuenca provienen de los numerosos acuíferos existentes.

La cuenca del Segura tiene un clima de tipo Mediterráneo que se caracteriza por un verano muy seco y caluroso, donde son frecuentes tanto las sequías interanuales como las lluvias esporádicas y torrenciales (otoño). Según zonas, el clima es de tipo Mediterráneo continental, subtropical, subtropical semiárido o subtropical árido. La precipitación media es de 400 mm anuales, con una alta variabilidad interanual y con

grandes diferencias a lo largo de la cuenca. La temperatura media oscila entre 10°C y 18°C, alcanzando temperaturas máximas de 40°C. La evaporación en la cuenca, medida en tanque Clase-A, oscila entre 1.600 mm y 2.000 mm (Martínez-Álvarez *et al.*, 2007).

La cuenca del Segura es una región predominantemente agraria, donde aproximadamente el 52,1% de la superficie corresponde a tierras de cultivo, mientras que el 45,2% es terreno forestal, el 2,1% son superficies artificiales, el 0,4% masas de agua y el 0,2% humedales (CHS, 2007). La superficie agraria de la Demarcación Hidrográfica del Segura asciende a 679.976 ha, mientras que la superficie regable es de 389.256 ha, de las que 269.022 ha constituyen la superficie regada (69,1%) (CHS, 2007). La superficie de regadío se ha duplicado en los últimos 35 años, lo que agrava la situación de escasez de agua de la cuenca y el problema de la sobreexplotación en muchos acuíferos (Molina *et al.*, 2009).

El sector de la agricultura es muy importante para la economía de la cuenca en términos de producción, empleo y exportaciones (Albiac *et al.*, 2006). El valor total de la producción agraria en la cuenca del Segura depende fundamentalmente del sector hortofrutícola, y por tanto del regadío, destacando los cultivos de hortalizas (41%), cítricos (16%), frutales de clima templado (13%) y uva (12%) (CHS, 2007). Por ejemplo, Albiac *et al.* (2008) estiman la importancia económica del regadío en la parte de la cuenca correspondiente a las provincias de Alicante, Almería y Murcia en 1.070 M€/año de ingresos para los agricultores, y en 536 M€ de renta neta anual. Posteriormente, Calatrava y Martínez-Granados (2012) analizan el valor económico de uso del agua en la agricultura de regadío de la cuenca del Segura, obteniendo unos valores marginal y medio del agua de 0,52 €/m³ y 0,81 €/m³ respectivamente para el conjunto de la cuenca (con notables diferencias entre zonas) y estimando en 879 M€/año la rentabilidad privada media del regadío de la cuenca, medida en términos de margen neto.

II.1.2. Balance hídrico de la cuenca del Segura

En la Tabla II.1 se resumen las estimaciones oficiales de los recursos y las demandas de agua en la cuenca del Segura. La media de las aportaciones al régimen natural en el período 1940-2005 es de 823 hm³/año, cifra que incluye tanto los recursos superficiales como los subterráneos renovables. Las extracciones de agua subterránea se estiman en 534 hm³/año, de los cuales 184 hm³/año corresponden a recursos no renovables (reservas). Los recursos procedentes de la reutilización del agua (retornos de riego y depuración de aguas residuales) son aproximadamente 146 hm³/año, mientras que los procedentes de desalinización son 83 hm³/año (CHS, 2007).

Tabla II.1. Balance hídrico de la cuenca del Segura.

Recursos (hm ³ /año)		Demandas (hm ³ /año)	
Renovables propios	823	Urbana	217
Aportaciones teóricas del ATS	540	Agraria	1.662
Subterráneos no renovables	184	Industriales	23
Reutilización de recursos	146	Ambientales	60
Desalinización (otros renovables)	83		
Otros no renovables	35		
Total recursos	1.811	Total demandas	1.962

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la CHS (2005, 2007).

En cuanto a los recursos superficiales provenientes del Trasvase Tajo-Segura, los volúmenes netos a trasvasar se establecieron en 540 hm³/año (600 hm³/año brutos en origen menos las pérdidas en el transporte), de los cuales solamente 466 hm³/año tienen como destino la cuenca del Segura, y 335 hm³/año el regadío de la cuenca. Las zonas regables que utilizan agua del trasvase Tajo-Segura, que incluyen algunas zonas no situadas dentro de la Demarcación Hidrográfica del Segura pero pertenecientes a su ámbito de planificación hidrológica, comprenden un total de 135.643 hectáreas, a las que corresponde un total de 400 hm³/año en origen, si bien en la práctica las aportaciones reales han sido muy inferiores.

Esta disponibilidad de recursos no basta para satisfacer la demanda bruta de agua de la cuenca, que se estima en 1.962 hm³/año, de los que 1.662 hm³/año corresponden a los usos agrarios (Tabla II.1). Para el cálculo del balance hídrico de la cuenca no se consideran los recursos no renovables utilizados en la cuenca, por lo que, para una demanda de 1.962 hm³/año y un total de recursos renovables de 1.592 hm³/año, se obtendría un déficit estructural de aproximadamente 370 hm³/año. Este déficit se cubre mediante las extracciones de recursos subterráneos no renovables y mediante una aplicación deficitaria de agua a los cultivos en muchas zonas, que se estima en 230 hm³/año. Este déficit se debe principalmente al incremento de la superficie de riego durante las tres últimas décadas, que fue impulsado por las optimistas expectativas iniciales sobre los recursos a trasvasar desde la cabecera del Tajo.

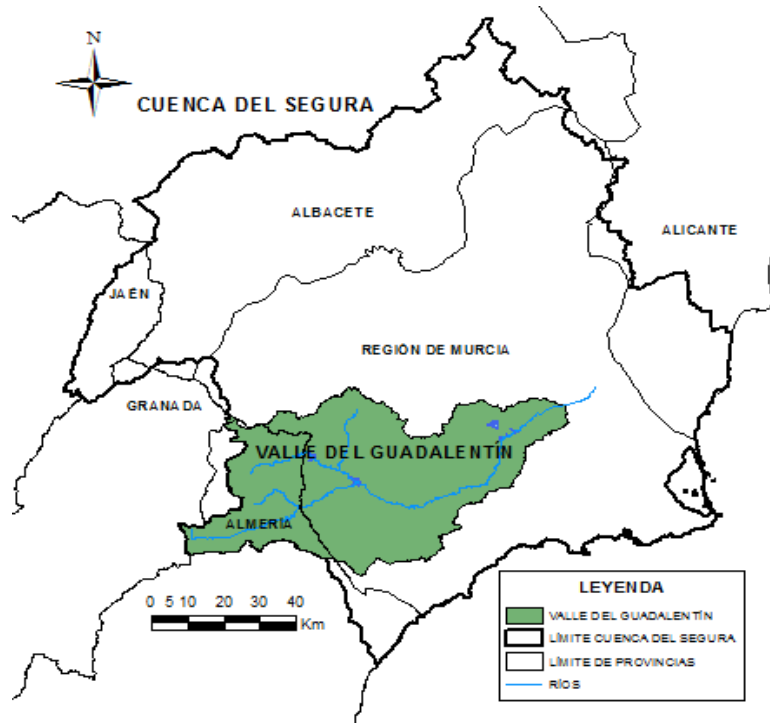
La estimación de los recursos medios disponibles recogida en la Tabla II.1 constituye un escenario poco realista. Aparte de asumir una situación hidrológica normal, se considera también que el trasvase Tajo-Segura proporciona anualmente la totalidad de los 600 hm³ máximos asignados (MMA, 2001). En la práctica, y como

consecuencia de la reducción de las aportaciones en la cabecera del Tajo, las cantidades anuales efectivamente trasvasadas han sido mucho menores, variables e inciertas. Según datos de la Comisaría de Aguas de la CHS, la media de las aportaciones netas reales para el regadío en el período 1978-2009 fue de 193 hm³/año, si bien la media para el período 1999-2009 fue de 241,4 hm³/año. De manera similar, la estimación de los recursos renovables propios ha de ser revisada en base a las cifras más recientes. Si bien la media de las aportaciones al régimen natural en el período 1940-2005 es de 823 hm³/año, la media del período 1980-2005 fue de sólo 663 hm³/año (CHS, 2006).

II.1.3. La cuenca del Guadalentín

La cuenca del río Guadalentín pertenece a la Demarcación Hidrográfica del Segura (Figura II.3), situándose al suroeste de ésta, entre las sierras de Espuña y Carrascoy. El cauce principal de la cuenca (río Guadalentín) tiene un caudal generalmente esporádico, asociado a su carácter de rambla más que de río propiamente dicho. Su superficie se extiende aproximadamente a través de 3.300 km² y se denomina "Zona Hidráulica V Valle del Guadalentín" según el Plan Hidrológico del Segura (CHS, 1998). La cuenca pertenece a las comunidades autónomas de la Región de Murcia y Andalucía. La parte de la cuenca que pertenece a la Región de Murcia ocupa una superficie de 2.200 km² y es donde se localiza la mayor parte de la población y la agricultura de regadío (Calatrava *et al.*, 2001).

Figura II.3. Ámbito territorial y localización de la cuenca del Guadalentín en la cuenca del Segura. Fuente: Elaboración propia.



La cuenca del Guadalentín comprende quince municipios, los de mayor importancia, por encontrarse ubicados casi en su integridad dentro del Valle del Guadalentín, son: Aledo, Alhama de Murcia, Librilla, Lorca, Puerto-Lumbreras, Totana, Chirivel, María, Vélez Blanco y Vélez Rubio. En la zona del suroeste se encuentran los municipios de Águilas, Lorca y Puerto Lumbreras.

La Comarca del Suroeste de Murcia y Valle del Guadalentín constituye una de las regiones agrarias más productivas de España y de Europa. Debido a sus características de clima mediterráneo semiárido dispone de un régimen de temperaturas idóneo para el cultivo de hortalizas fuera de temporada. La temperatura media anual oscila entre 12°C y 18°C, siendo más elevadas en los meses estivales. En cuanto a las precipitaciones, éstas son escasas y oscilan entre los 250 mm y 500 mm anuales. La mayor parte del territorio recibe menos de 350 mm al año. Son frecuentes tanto las sequías prolongadas como los episodios de lluvias torrenciales, que producen inundaciones similares a las características del resto de la cuenca del Segura.

II.1.4. Balance hídrico de la cuenca del Guadalentín

En la cuenca del Guadalentín se ubican siete Unidades de Demanda Agraria (UDAs según la terminología utilizada por la CHS), según se muestra en la Figura II.4. La superficie y demandas de agua de dichas UDAs se recogen en la Tabla II.2. Seis de estas UDAs se encuentran dentro del perímetro de la cuenca, encontrándose parcialmente fuera de dicho perímetro la UDA 68, aunque se considera íntegramente en este estudio porque parte de sus aportaciones de recursos hídricos subterráneos provienen del acuífero compartido “Alto Guadalentín”.

Las siete UDAs consideradas ocupan una superficie bruta de 84.909 ha y una superficie regable (superficie neta) de 50.633 ha (CHS, 2008a). De acuerdo con la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS, 2008b) la demanda de agua agraria en estas zonas de regadío es de 284,2 hm³/año (Tabla II.2).

Figura II.4. UDAs del Valle del Guadalentín. Fuente: Elaboración propia.

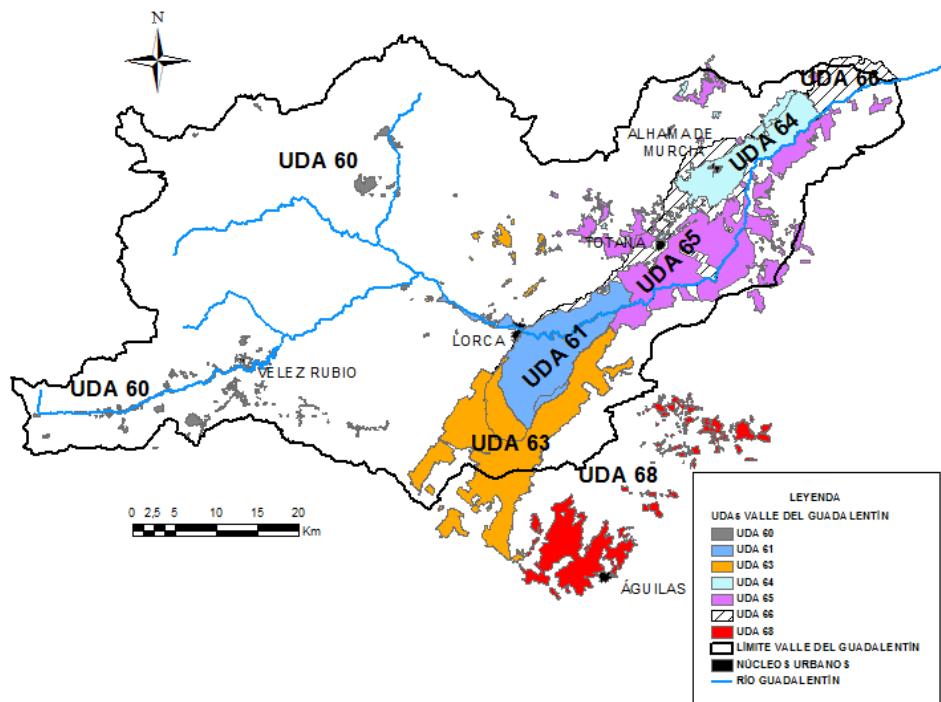


Tabla II.2. Superficie y demanda de agua de las UDAs del Valle del Guadalentín.

UDAs (Nombre y código)	Superficie total (ha)	Superficie regable (ha)	Demanda de agua (hm ³ /año)	Recursos disponibles (hm ³ /año)
Regadíos aguas arriba de Puentes (60)	2.411	1.742	6,7	5,6
Regadíos de Lorca (61)	11.782	9.013	49,8	34,7
Acuíferos del Alto Guadalentín (63)	21.266	9.942	54,1	36,0
Mixtos del Bajo Guadalentín (64)	7.885	5.027	29,2	19,1
Subterráneas del Bajo Guadalentín (65)	21.362	12.710	72,0	38,9
Nuevos regadíos Lorca y Valle del Guadalentín (66)	10.798	7.802	45,4	13,6
Águilas (68)	9.405	4.397	27,0	21,4
Total	84.909	50.633	284,2	169,3

Fuente: Elaboración propia usando datos de la Confederación Hidrográfica de Segura (CHS, 2008a, 2008b).

La aportación media recibida por las UDAs del Valle del Guadalentín, según la planificación hidrológica, es de 206,9 hm³/año, incluyendo varias fuentes de suministro de agua (Tabla II.3). Los suministros de agua subterránea representan el 50,9% de los recursos hídricos de la zona, mientras que el agua superficial supone solamente el 10,5% de los mismos. El ATS suministra el 31,4% de los recursos en la zona. La reutilización de agua proveniente de la depuración de aguas residuales urbanas es el 3,4%. Por último el suministro actual de agua proveniente de la desalinización de agua marina es de 8 hm³ anuales, el 3,9% de los recursos hídricos del Valle del Guadalentín.

Tabla II.3. Derechos de agua y concesiones disponibles en las UDAs del Valle del Guadalentín (hm³/año).

UDAs:	60	61	63	64	65	66	68	Total
Recursos superficiales	2,6	13,9	0,0	4,1	1,1	0,0	0,0	21,7
Aportaciones del ATS	0,0	30,0	0,9	5,1	6,2	22,7	0,0	64,9
Reutilización de recursos	0,0	4,4	0,3	0,5	0,5	0,0	1,3	7,0
Recursos desalinizados	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0	8,0
Recursos subterráneos	4,1	1,5	37,0	13,4	37,1	0,0	12,2	105,3
Recursos totales	6,7	49,8	38,2	23,1	44,9	22,7	21,5	206,9

Fuente: Elaboración propia usando datos de la Confederación Hidrográfica de Segura (CHS, 2006, 2008b).

Los datos sobre disponibilidad de agua que se muestran en la Tabla II.3 son meramente teóricos, basados en los derechos y concesiones existentes, y sirven solo para fines de planificación. Se basan en el promedio de aportaciones de recursos hídricos renovables al régimen natural de la cuenca del Segura para el período 1940-1996 (823 hm³/año según la CHS, 2006), y en asumir que el ATS siempre transfiere su máxima asignación legal para uso en el regadío (400 hm³/año). Sin embargo, este escenario de disponibilidad de agua tan optimista, nunca se ha producido.

En la práctica, los recursos disponibles son menores, como se muestra en la Tabla II.4. En primer lugar, los recursos renovables disponibles para el riego son de aproximadamente el 80% de los recursos a nivel teórico, de acuerdo con el promedio de las aportaciones al régimen natural para el periodo 1980-2005 estimado en el Plan de Contingencia de Sequía de la cuenca del Segura (663 hm³/año según CHS, 2006). En segundo lugar, el ATS sólo suministra en promedio el 60% de su máxima asignación de agua transferible para el riego. Finalmente, la disponibilidad de agua real procedente de las fuentes de desalinización y reutilización sí se corresponde con la disponibilidad a nivel teórico (Tabla II.3).

Tabla II.4. Recursos de agua disponibles actualmente en las UDAs del Valle del Guadalentín y bombeos de recursos subterráneos no renovables (hm³/año).

UDAs:	60	61	63	64	65	66	68	Total
Recursos superficiales	2,1	11,1	0,0	3,3	0,9	0,0	0,0	17,4
Aportaciones del ATS	0,0	18,0	0,5	3,1	3,7	13,6	0,0	38,9
Reutilización de recursos	0,0	4,4	0,3	0,5	0,5	0,0	1,3	7,0
Recursos desalinizados	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0	8,0
Recursos subterráneos	3,6	1,2	35,1	12,2	33,8	0,0	12,1	98,0
Recursos totales	5,6	34,7	36,0	19,1	38,9	13,6	21,4	169,3
Bombeos no renovables	1,4	0,0	27,6	7,6	20,5	0,0	11,6	68,7

Fuente: Elaboración propia usando datos de la Confederación Hidrográfica de Segura (CHS, 2006, 2008b). Los recursos subterráneos incluyen las infiltraciones de las aplicaciones de agua a los cultivos.

Los recursos disponibles actualmente (Tabla II.4) sólo cubren el 60% de la demanda agraria de agua en el Valle del Guadalentín (la diferencia entre la demanda agraria de agua y la disponibilidad actual de recursos es de 114,9 hm³/año, calculada a partir de los datos mostrados en la Tabla II.2). Este déficit da lugar a un riego deficitario

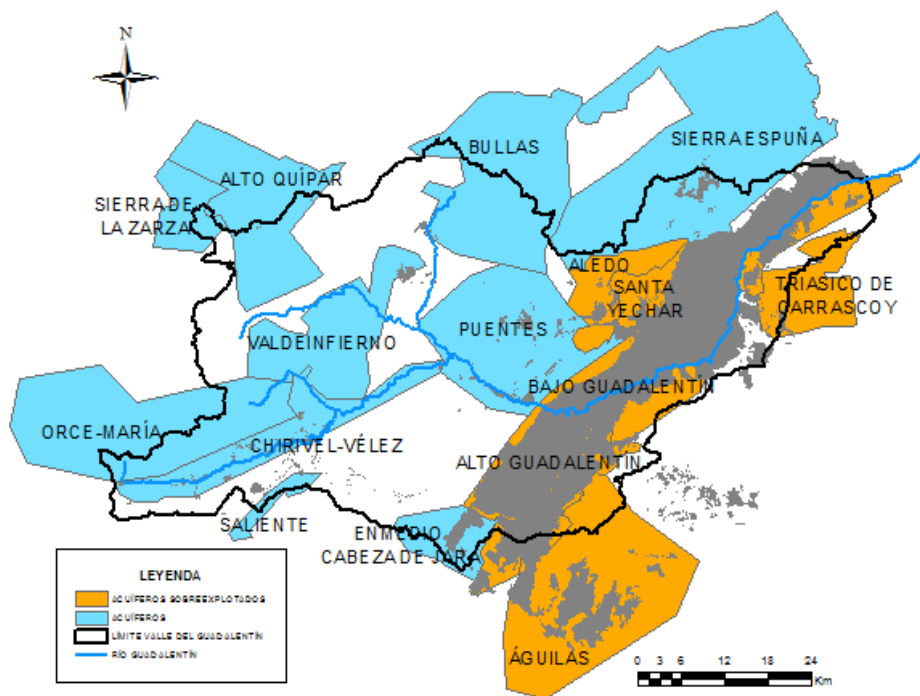
en los cultivos, los cuales en muchas ocasiones están sujetos a condiciones de estrés hídrico, estimándose que el déficit en riego alcanza los 77,3 hm³ anuales (diferencia entre la demanda agraria de agua total estimada en 284,2 hm³/año y los derechos de agua y concesiones totales de la zona, que ascienden a 206,9 hm³/año, según se muestra en las Tablas II.2 y II.3, respectivamente). Sin embargo, si se considerara solamente la disponibilidad de recursos renovables el déficit sería notablemente superior. Hay que tener en cuenta que 68,7 hm³/año de los 169,3 hm³/año de los recursos disponibles corresponden a recursos provenientes de bombeos no renovables de agua subterránea, por lo que los recursos renovables alcanzan los 100,6 hm³ anuales. Por lo tanto, si sólo fuesen utilizados los recursos renovables (100,6 hm³/año), se cubriría sólo el 35% de la demanda a nivel teórico de agua para la agricultura (284,2 hm³/año) y el 49% de la demanda de agua para la agricultura una vez que el déficit de aplicación de agua a los cultivos ha sido contabilizado.

Las aportaciones de recursos subterráneos provienen de los 17 acuíferos ubicados, total o parcialmente, en la zona del Valle del Guadalentín (CHS, 2007) y ascienden a 98 hm³/año, de los cuales 68,7 hm³/año corresponden a recursos subterráneos no renovables. El uso masivo de los recursos subterráneos ha generado una sobreexplotación de seis de los acuíferos del Valle del Guadalentín (CHS, 2008a), incidiendo sobre todo en los acuíferos del Alto y Bajo Guadalentín (Figura II.5). Por ejemplo la sobreexplotación acumulada es de aproximadamente 1.500 hm³ en el acuífero Alto Guadalentín y de 660 hm³ en el acuífero Bajo Guadalentín, lo que se traduce en que si cesaran por completo los bombeos de agua, se tardarían alrededor de 150 y 70 años para recuperar el estado inicial de los acuíferos del Alto y Bajo Guadalentín, respectivamente.

Para solucionar el problema de la sobreexplotación de los acuíferos del Valle del Guadalentín, la Confederación Hidrográfica del Segura ha planteado una serie de medidas para reducir las extracciones de agua (CHS, 2008a). Dichas medidas son la elaboración de planes de ordenación de los acuíferos que incluyen el cierre de pozos no sujetos a concesiones, el control de los bombeos respetando las cuotas de extracción establecidas en los derechos y concesiones, la reducción de las cuotas de extracción, la expropiación de derechos de agua subterránea y la permuta de caudales subterráneos por nuevos recursos procedentes de la desalinización de agua marina en

las plantas desalinizadoras de Águilas y Valdelentisco. Estas plantas de desalinización, una vez que funcionen a plena capacidad y estén conectadas con los usuarios finales, podrán suministrar hasta 130 hm³/año para abastecimiento urbano y uso en el riego. La disponibilidad total de agua desalinizada para usos agrarios en el Guadalentín se estima que será de aproximadamente 80 hm³/año a partir del año 2015.

Figura II.5. Acuíferos del Valle del Guadalentín. Fuente: Elaboración propia.



II.2. Técnicas para estimar la evaporación en balsas de riego y grandes embalses

Existen numerosos métodos para estimar la evaporación en grandes embalses de regulación y en balsas de riego. A continuación se presentan de forma resumida algunas de las metodologías más utilizadas para tal fin, agrupadas en diferentes categorías:

Método aerodinámico o de transferencia de masa

Los métodos de transferencia de masa han sido los más utilizados para estimar la evaporación (E), permitiendo derivar formulas empíricas de evaporación en lámina libre (Santori, 2000) a partir de datos experimentales. Estos métodos se basan en los mecanismos que transportan el vapor de agua desde la superficie de agua hacia el aire que la rodea (Gallego, 2011). Un componente de la ecuación para el cálculo de la E por este método es la función de viento, función que depende de las condiciones climáticas donde se ha determinado, la altura a la que se registran las variables climáticas y las características geométricas del cuerpo de agua. El segundo componente de las fórmulas de transferencia de masa es el gradiente de presión de vapor de agua-aire, por lo que se requiere conocer la temperatura superficial del agua, pudiéndose medir in situ en embalses y lagos o estimarse mediante técnicas de teledetección (Anderson *et al.*, 1999). En general, su aplicación queda limitada a la escala temporal y a la localización en la que fueron desarrolladas (Sing and Xu, 1997)

Método balance de energía

El método del balance de energía se basa en la estimación de la temperatura superficial del agua mediante la resolución del balance energético de la masa de agua, por lo que se supera la necesidad de conocer la temperatura superficial del agua. Se utilizan planteamientos mecanicistas del balance de energía en la masa de agua (Molina Martínez *et al.*, 2006; Martínez-Álvarez *et al.*, 2007), que tienen en cuenta la geometría del embalse (superficie y profundidad) y los datos micro climáticos habitualmente disponibles en las estaciones meteorológicas (radiación solar, humedad relativa, temperatura del aire y velocidad del viento). La resolución del balance de energía permite estimar el valor diario de la temperatura superficial del agua, para posteriormente estimar la E mediante ecuaciones de transferencia de masa calibradas regionalmente. Las balsas de riego como las que se encuentran en la cuenca del Segura se caracterizan por tener poca profundidad (5-10 m) y una superficie limitada (1.000-30.000 m²). En condiciones climáticas típicas de climas áridos y semiáridos se ha observado un comportamiento anual isotérmico en este tipo de balsas (Molina *et al.*, 2005). Por tanto, la estimación de la temperatura superficial puede abordarse mediante un balance de energía basado en la hipótesis del comportamiento isoterma, con el fin de calcular la tasa de evaporación en este tipo de infraestructuras de riego. En base a este planteamiento Martínez Álvarez *et al.* (2007) determinaron la tasa de evaporación y el coeficiente de tanque (K_p) de balsas de riego. Estos autores propusieron una nueva formulación de la función del viento integrando la geometría del cuerpo de agua y

unificando en una única función las ecuaciones de Harbeck (1962), Brutsaert (1982) y Molina Martínez (2004), de tal manera que la función permite contabilizar la influencia de las dimensiones del embalse en la tasa de evaporación. Los resultados mostraron que, teniendo en cuenta una escala mensual, la profundidad es el principal factor que regula el valor de la temperatura superficial y la evaporación en el embalse, mientras que la superficie apenas influye. El K_p mensual presenta unos valores en el rango de 0,5-1,5 en embalses profundos y de 0,8-1,2 en embalses superficiales. A escala anual apenas hay variaciones en K_p , variando en un rango de 0,76-0,86 en función del área y del déficit de presión de vapor local.

Métodos combinados (Balance de energía y transferencia de masa)

Penman (1948) elaboró una ecuación para el cálculo de la evaporación que combinaba el balance de energía y la transferencia de masa, siendo la referencia para estimar la evaporación en cultivos más utilizada en los últimos 60 años. Este método se ha utilizado para calcular la evaporación en lagos, grandes embalses y balsas de riego. Sin embargo, puede inducir a errores utilizar la ecuación de Penman en el cálculo de la evaporación en grandes embalses o lagos ya que no considera el calor almacenado o perdido por el agua (Martínez *et al.*, 2007).

Por otro lado, Priestley y Taylor (1972) simplificaron la ecuación de Penman utilizando la evaporación de equilibrio como concepto para describir la evaporación de una superficie húmeda bajo condiciones de mínima advección atmosférica (Gallego, 2011).

Por último Bruin (1978) utilizó una combinación de las ecuaciones propuestas por Penman y Priestley-Taylor, elaborando una nueva ecuación con la que se calcula la evaporación sin necesidad de conocer la radiación solar neta.

Método de tanque evaporímetro

Este método es el más empleado en ausencia de datos climáticos para estimar la evaporación de un cuerpo de agua. Consiste en la determinación de la evaporación en una masa de agua a partir de la evaporación registrada en otra masa de agua normalizada. Como elemento de referencia, el tanque evaporímetro Clase A (Linacre, 1994) es el más utilizado en todo el mundo. Está fabricado con hierro galvanizado y sus dimensiones son de 1,21 m de diámetro y 25 cm de profundidad. Se coloca a 10 cm del suelo sobre una plataforma de madera. El valor del coeficiente de tanque es de

0,8 para climas húmedos y 0,6 para climas secos. Allen *et al.* (1971) propusieron la utilización de un coeficiente medio de valor 0,7. La evaporación en este tipo de tanques es mayor que la de los embalses, debido a que presenta una mayor transferencia de calor sensible como consecuencia de un mayor calentamiento de sus paredes, aumentando la temperatura superficial del agua y por tanto la tasa de evaporación. Además interfiere también la ubicación del tanque, dado que las condiciones del viento y la humedad pueden influir en la estimación del coeficiente de tanque (Témez, 2007).

II.3. Evaluación de las pérdidas por evaporación

En climas áridos y semiáridos, las pérdidas por evaporación de agua en embalses pueden ser elevadas. Craig *et al.* (2005) estimaron la evaporación anual procedente de pequeñas balsas de riego en Queensland (Australia) en aproximadamente 1.000 hm³, sobre una capacidad total de almacenamiento de 2.500 hm³. Según estos autores, este volumen de agua sería suficiente para abastecer unas 125.000 ha de cultivo. Gökbülak y Özhan (2006) estimaron que la evaporación anual de los lagos y grandes embalses de Turquía es mayor que las extracciones de aguas subterráneas, superior al consumo de agua con fines domésticos e industriales, y equivalente a la quinta parte del agua aplicada a los regadíos del país. En la cuenca del Río Grande (EEUU), la evaporación en un embalse de tamaño medio (Elephant Butte) representa el 15-25% del consumo de agua anual de la ciudad de Rio Grande en Nuevo México (Gupta *et al.*, 2002). En España, Martínez-Álvarez *et al.* (2008) estimaron que la evaporación anual en las balsas de riego de la cuenca del Segura es aproximadamente de 58 hm³, lo que representa más del 8% del agua de riego utilizada en la cuenca durante el periodo de estudio. Tales pérdidas afectan a la eficiencia global de uso del agua, especialmente en la agricultura, contrarrestando los importantes esfuerzos realizados en las explotaciones agrarias para la incorporación de tecnologías eficientes de riego (goteo y micro-aspersión).

Los estudios referenciados ponen de manifiesto que las pérdidas por evaporación, tanto en grandes embalses como en pequeñas balsas de riego, pueden ser importantes. Por lo tanto, en regiones con escasez de agua es crucial evaluar dichas pérdidas y su impacto económico, cuestión que podría ayudar a optimizar la contabilidad y la gestión de los recursos hídricos (Morton, 1994; Stanhill, 2002).

Puesto que el sector agrario es generalmente el más afectado por la escasez de agua, cualquier evaluación de alternativas para reducir las pérdidas por evaporación de agua debe tener en cuenta su impacto económico sobre la agricultura de regadío. Por

ejemplo, Ward (1987) evalúa el impacto económico sobre la agricultura asociado al incremento de las pérdidas por evaporación de agua que se produce al programar desembalses de las presas del Río Chama de Nuevo México para satisfacer la demanda recreativa, encontrando que dicho impacto es menor que los beneficios derivados de los usos recreativos. Craig *et al.* (2005) proporcionan una estimación aproximada del valor de la producción agraria no generada como consecuencia de las pérdidas por evaporación en las balsas de riego de Queensland (Australia), alcanzando un valor de aproximadamente 375 M\$. No se han encontrado estudios hasta la fecha que evalúen el impacto de las pérdidas por evaporación en los grandes embalses y en las balsas de riego desde una perspectiva económica y a escala de cuenca.

Los escenarios de cambio climático prevén que aumente la evaporación de agua en embalses, dada la mayor capacidad de la atmosfera para retener agua a temperaturas más altas, si bien no se prevé que la humedad relativa cambie notablemente. Como resultado, el déficit de vapor de agua en la atmósfera aumentará, al igual que la tasa de evaporación (Trenberth *et al.*, 2003). En la cuenca del Segura se espera que la temperatura media del aire aumente en 1°C y 2,5°C para los escenarios de 2030 y de 2060, respectivamente (MIMAM, 2000; Moreno *et al.*, 2005). La magnitud de estas predicciones hace crucial evaluar el creciente impacto económico en escenarios futuros de las pérdidas por evaporación en masas de agua.

Hay muy pocos estudios sobre los efectos del cambio climático en la evaporación de las masas de agua (Schindler y Donahue, 2006; Jurak, 1989), así como pocos estudios que evalúen el impacto de las pérdidas por evaporación desde una perspectiva económica (Ward 1987; Craig *et al.*, 2005). Tampoco se han publicado hasta la fecha estudios sobre la evaluación económica de las pérdidas por evaporación ante los futuros escenarios de disponibilidad de agua.

II.4. Valoración económica del agua de riego

La literatura sobre valoración económica de los recursos hídricos es profusa en metodologías y aplicaciones a numerosas zonas de todo el mundo. En el caso concreto de España, existen numerosos precedentes de análisis económicos del uso agrario del agua, desde los más básicos a nivel de cultivo hasta otros que estiman el valor económico del agua a nivel de zonas regables, comarcas, comunidades autónomas, etc. Algún trabajo realiza incluso estimaciones a nivel de cuenca hidrográfica (Berbel y Mesa, 2007, en la cuenca del Guadalquivir). A nivel nacional, el Grupo de Análisis Económico del Ministerio de Medio Ambiente realizó una estimación del Margen Neto

medio por m³ de agua en todas las comarcas españolas utilizando el modelo MODERE (Maestu y Gómez, 2008; Gutiérrez y Gómez, 2009), mientras que el estudio de Gil *et al.* (2009) aborda el análisis econométrico de la productividad del uso agrario del agua por provincias. Muchos de los trabajos nacionales existentes estiman funciones de demanda del agua para sus zonas de estudio con el objeto de analizar el impacto de políticas tarifarias o de mercados de agua (Albiac *et al.*, 2006 y 2008; Arriaza *et al.*, 2002 y 2003; Ballestero *et al.*, 2002; Garrido, 2000; Calatrava y Garrido, 2001, 2005 y 2006; Gómez-Limón y Martínez, 2006; Gómez-Limón y Riesgo, 2004; Riesgo y Gómez-Limón, 2005; Kahil *et al.*, 2015). Otros trabajos realizan estimaciones puntuales de la productividad aparente o del valor medio del agua de riego (Colino Sueiras y Martínez-Paz, 2007; Maeztu y Gómez, 2008; Berbel *et al.*, 2011).

Sin embargo, y frente a otras zonas como el Guadalquivir o el Duero que han sido objeto de numerosos estudios durante los últimos 15 años, no abundan los trabajos que estimen el valor del agua en el regadío de la cuenca del Segura. Además, ninguno de ellos realiza un análisis considerando la totalidad de la cuenca. En primer lugar, Alcalá Agulló y Sancho Portero (2002) realizan un análisis econométrico del impacto de la disponibilidad de agua sobre el Valor Añadido Bruto (VAB) agrario en la Región de Murcia, utilizando datos provenientes de estadísticas oficiales para el período 1976-1998. El valor marginal del agua estimado, medido en términos de VAB, oscila entre los 0,32 y los 0,37 €/m³ según los modelos estimados. Puesto que la especificación de los modelos estimados es lineal con respecto a la variable agua, el valor marginal del agua obtenido es constante.

Por su parte, Colino Sueiras y Martínez-Paz (2007) realizan una estimación de los valores medios de productividad, margen y beneficio neto del agua para los cultivos hortícolas de la Región de Murcia a partir de los datos contenidos en AMOPA (2000). Estos autores indican que la disposición media a pagar por el agua de riego es de 0,43 €/m³, valor obtenido a partir de una encuesta a agricultores de cultivos protegidos de la Región de Murcia realizada en 2004/2005. Al igual que en el estudio de Alcalá Agulló y Sancho Portero (2002), el valor marginal del agua estimado no depende de la disponibilidad de agua.

Ballestero *et al.* (2002) estiman una curva de valor marginal del agua de riego en la zona regable de Lorca. Albiac *et al.* (2008) proporcionan una estimación de la productividad aparente y del valor medio y marginal del agua de riego (medido en términos de Renta) para aquellas comarcas de las provincias de Alicante y Murcia que pertenecen a la cuenca del Segura, pero no para la totalidad de la cuenca. La

productividad aparente estimada oscila entre los 0,75 €/m³ de la Vega del Segura y del Bajo Segura y los 3,12 €/m³ del Campo de Cartagena, mientras que el valor medio del agua oscila entre los 0,37 €/m³ de la comarca alicantina del Bajo Segura y los 1,40 €/m³ del Campo de Cartagena. Los valores marginales obtenidos por Albiac *et al.* (2008) para el agua de riego en las comarcas de la cuenca del Segura analizadas están en el rango 0,11-0,24 €/m³, valores que son inferiores a los obtenidos en otros trabajos debido a que las disponibilidades de agua consideradas en el análisis son las teóricas contempladas en CHS (1998) y MMA (2001). Finalmente, Rigby *et al.* (2010) obtienen un valor medio de 0,45 €/m³ para el agua de riego en el Campo de Cartagena.

Existen numerosas metodologías alternativas para la valoración económica del agua en la agricultura de regadío, como el método residual (*net-back analysis*), los basados en funciones de producción, los basados en modelos econométricos, los basados en métodos de preferencias expresadas, los basados en el análisis de precios hedónicos, etc. (Amigues *et al.*, 1994; Young, 2005). De todos los métodos existentes, la modelización mediante programación matemática es la opción más eficiente para la modelización económica de la agricultura de regadío propuesta en este estudio, ya que es útil para determinar las funciones de demanda de agua en sistemas agrarios con más de un cultivo y requiere de menos datos que otros métodos más costosos (Young, 2005). De hecho, los modelos de optimización son los más utilizados para el cálculo de las funciones de demanda de agua en la agricultura (Bazzani *et al.* 2005).

La modelización de la producción agraria mediante programación matemática se basa en el uso de modelos de optimización que asignan superficie, agua y otros factores de producción entre distintas actividades de cultivo, siendo posiblemente el método más adecuado para obtener funciones de demanda de agua en sistemas agrarios con más de un cultivo (Young, 2005). Se trata de una metodología que ya ha sido aplicada por numerosos autores, siendo con diferencia la más extendida y utilizada, y existiendo numerosas aplicaciones a nivel nacional. Sirvan como ejemplo los trabajos de Varela-Ortega *et al.* (1998), Albiac *et al.* (2006, 2008), Arriaza *et al.* (2002, 2003) Calatrava y Garrido (2001, 2005, 2006), Garrido (2000), Gómez-Limón y Riesgo (2004), Gómez-Limón y Martínez (2006), Iglesias *et al.* (2003), Iglesias y Blanco (2004), Kahil *et al.* (2015) y Riesgo y Gómez-Limón (2005).

La principal ventaja de utilizar la programación matemática es que permite introducir gran cantidad de información técnica y económica al nivel de desagregación que se considere apropiado o para el que se disponga de información, así como estimar el impacto sobre el valor del agua de cambios en los parámetros técnicos y económicos

utilizados en el modelo (por ejemplo, cambios en la disponibilidad de agua, en los rendimientos de los cultivos, en los costes de producción, en los precios de los cultivos, en las tarifas del agua, mejoras tecnológicas, etc.). En el caso de esta tesis, el uso de modelos de programación matemática permite obtener curvas que relacionen el valor del agua con su disponibilidad.

Otra ventaja de la programación matemática es que permite agregar o desagregar los resultados al nivel que se necesite o para el que se disponga de información (tipos de explotaciones, comunidad de regantes, zona regable, subcuenca, etc.). La mayoría de los trabajos de valoración de los usos agrarios del agua a nivel nacional realizan análisis en una o varias comunidades de regantes que toman como representativa de una determinada zona (Garrido, 2000; Calatrava y Garrido, 2001), y frecuentemente considerando diferentes tipos de explotaciones de una o varias comunidades de regantes (Arriaza *et al.*, 2002 y 2003; Calatrava y Garrido 2005a, 2005b y 2006; Riesgo y Gómez-Limón, 2005; Gómez-Limón y Martínez, 2006). Los trabajos que hacen análisis a nivel regional o de cuenca hidrográfica suelen tomar como unidad de análisis la comarca (Albiac *et al.*, 2006 y 2008; Maestu y Gómez, 2008; Gutiérrez y Gómez, 2009), siendo escasos los que consideran la zona regable (Kahil *et al.*, 2015).

II.5. Uso de instrumentos económicos para la gestión de acuíferos

Existen numerosos trabajos que han analizado el uso de instrumentos económicos para la gestión de acuíferos, si bien existen pocos trabajos a nivel nacional (Iglesias, 2002; Carmona *et al.*, 2011; Esteban y Albiac, 2011; Kahil *et al.*, 2015). Muchos estudios sobre la gestión de agua en España se centran en la gestión de las aguas superficiales, en tanto que las subterráneas y las características específicas de su gestión han recibido una atención considerablemente menor (Iglesias, 2002).

Un instrumento que ha recibido especial atención en la literatura es el establecimiento de precios al uso del agua, cuya efectividad sin embargo es bastante

cuestionada. En la mayoría de los países, los regantes no pagan a las autoridades tarifa alguna por el agua subterránea (Berbel *et al.*, 2007). Los regantes que se abastecen de acuíferos normalmente pagan la totalidad de los costes financieros de la inversión, el mantenimiento y los costes de energía para el bombeo del agua, pero nada de los costes sociales o ambientales, los cuales suelen ser significativos (Garrido y Calatrava, 2010). Esto genera un uso no sostenible de los recursos subterráneos. La excepción son países como Francia u Holanda que han impuesto tasas ambientales para las aguas subterráneas, si bien éstas apenas permiten internalizar una parte de todos los costes (Garrido y Calatrava, 2010). La reforma de 2006 de la Ley de Aguas Francesa estableció una tasa sobre las extracciones de recursos superficiales y subterráneos (Graveline, 2013), mientras que Holanda estableció en 1994 una tasa ambiental sobre las extracciones de recursos subterráneos que fue eliminada en 2011 por su ineficiencia (Schuerhoff *et al.*, 2013).

La abundante literatura sobre el tema sugiere que no se deben tener demasiadas expectativas en las políticas de precios del agua de riego como posible solución a los problemas de asignación del agua (Garrido y Calatrava, 2010). Muchos de los numerosos trabajos sobre tarificación del agua de riego sugieren que su demanda es muy inelástica en el corto plazo, al menos para precios del agua bajos o reducida disponibilidad de agua (Mejías *et al.*, 2004; Scheierling *et al.*, 2004; Bazzani *et al.*, 2005; Riesgo y Gómez-Limón, 2005 y 2006; Scheierling *et al.*, 2006; Bartolini *et al.*, 2007; Molle y Berkoff, 2007; Wheeler *et al.*, 2008). Esto se debe principalmente a la reducida elasticidad de sustitución del agua por otros inputs, a lo inelástico de la demanda de los productos agrarios, y al pequeño porcentaje de los costes de producción que supone el agua (García Mollá, 2002). La demanda del agua de riego se vuelve más elástica a medida que las tarifas del agua se incrementan.

En sistemas intensivos de regadío, como los del sureste español, la elasticidad de la demanda del agua de riego es especialmente baja, lo que puede reducir aún más el potencial de la tarificación para ahorrar agua. Esto es debido a que los cultivos más rentables pueden soportar mayores precios del agua (Mejías *et al.*, 2004). Además, los sistemas agrarios intensivos utilizan tecnologías de riego eficientes para hacer frente a la ya reducida disponibilidad de agua (es decir, el agua ha sido sustituida en gran medida por capital) y, por lo tanto, se reduce el potencial para un mayor ahorro de agua.

El impacto económico de incrementar los precios del agua para riego puede ser notable tanto para los agricultores como para la economía de las zonas rurales (Giannocarro *et al.*, 2010). El impacto de la tarificación será muy diferente según el

sistema de regadío considerado (Varela-Ortega *et al.*, 1998). En sistemas intensivos, en los que la demanda es inelástica, puede esperarse que el incremento de las tarifas del agua apenas reduzca el consumo de agua y sólo lo haga con la renta de los agricultores, mientras que en zonas de regadío tradicional, menos rentable, un incremento en el precio del agua reducirá el consumo y, paralelamente, la superficie de regadío, la renta de los agricultores y el empleo agrario (Berbel y Gutiérrez, 2005). Los efectos netos sobre la renta agraria de las políticas de precios del agua de riego serán por tanto menores cuanto mayor sea la productividad del agua de riego y mayor flexibilidad tengan los agricultores para adaptar sus demandas de agua, por ejemplo, mediante el cambio de cultivos (Mejías *et al.*, 2004; Garrido y Calatrava, 2010).

En general, en situaciones de sobreexplotación de acuíferos, no suele recurrirse a establecer tarifas, sino cuotas fijas, restricciones o zonificaciones. Diversos trabajos han analizado otras opciones como la restricción de extracciones mediante planes de gestión que incluyen el establecimiento de cuotas y su intercambio en mercados o bancos de agua, los pagos por reducir el consumo, la compra pública de derechos o la cooperación entre los usuarios del recurso (Iglesias, 2002; Hellegers and van Ierland, 2003; Albiac *et al.*, 2006 y 2008; Carmona *et al.*, 2011; Esteban y Albiac, 2011; Kahil *et al.*, 2015). Por ejemplo, Iglesias (2002) demuestra que un sistema de cuotas a las extracciones de recursos subterráneos con pagos compensatorios puede plantear conflictos a largo plazo, ya que los pagos van a suponer una compensación cada vez menor de las pérdidas impuestas por las cuotas, a medida que el nivel freático se recupere. Por el contrario, la gestión a través de un banco de agua contribuiría a reconciliar los intereses de los agricultores con la recuperación de acuíferos.

En España, los instrumentos más utilizados para reducir las extracciones de aguas subterráneas han sido la restricción de los bombeos mediante el establecimiento de cuotas de extracción, los pagos por reducir el consumo, y la compra de derechos de agua y concesiones por parte de la Administración (Iglesias, 2002; Carmona *et al.*, 2011). La experiencia sugiere que los pagos y las cuotas para reducir el consumo son ineficaces en la práctica debido a la falta de voluntad de los políticos y de cooperación por parte de los agricultores de las zonas donde se ha implementado (Esteban y Albiac, 2011). Independientemente del instrumento que se utilice, es necesaria una aplicación efectiva de los planes de gestión de los acuíferos para asegurar que se respetan las tasas de extracción sostenibles, lo que requiere de la acción colectiva y de la cooperación de las partes interesadas (Esteban y Albiac, 2011).

Por otra parte, la compra pública de derechos de agua de riego ha sido uno de los instrumentos más aplicados en España. En concreto, se ha aplicado a través del Plan Especial del Alto Guadiana y los centros de intercambio de las cuencas del Júcar y Guadiana (Garrido y Calatrava, 2009; Calatrava y Gómez-Ramos, 2009) con un éxito limitado, siendo uno de los instrumentos propuesto para su aplicación en la cuenca del Segura (CHS, 2008a). La compra pública de derechos de agua tiene la ventaja de reducir de forma permanente las extracciones y ser menos conflictiva que el establecimiento de cuotas de extracción, pero tiene como inconvenientes su alto coste presupuestario y sus potencialmente elevados impactos sobre el empleo y la economía de las zonas rurales. Carmona *et al.* (2011) muestran como, para conseguir una recuperación parcial de los niveles de los acuíferos en la cuenca del Alto Guadiana, es necesario restringir la disponibilidad de agua a los agricultores y establecer un precio de compra de los derechos de agua elevado. Sin embargo, el cumplimiento de las restricciones de agua reducirá los ingresos agrarios si no se adoptan medidas adicionales para compensar dichas pérdidas.

La Administración Ambiental Española también ha propuesto la sustitución de los recursos subterráneos sobreexplotados por recursos procedentes de la desalinización de agua marina (Downward y Taylor, 2007; CHS, 2008), siendo también una de las opciones defendidas por Albiac *et al.* (2006) por presentar menores costes privados y sociales. Albiac *et al.* (2006 y 2008) muestran como las alternativas de menor coste para afrontar los problemas de escasez de agua en el regadío del sureste español son aquellas que combinan el control de la sobreexplotación con los mercados de agua y la desalinización, mientras que la prohibición de la sobreexplotación de acuíferos y el incremento de los precios del agua pueden provocar fuertes pérdidas de renta agraria, generando oposición social y el fracaso de las medidas.

En algunas zonas, como es el caso de la cuenca del Segura, la disponibilidad de agua desalinizada se está incrementando, lo que ofrece una oportunidad para abordar este problema a un coste social y económico más bajo. Sin embargo, en principio, el uso de agua marina desalinizada puede no suponer en la práctica una alternativa efectiva para reducir la sobreexplotación de los acuíferos, debido a que el coste final para los usuarios de los recursos provenientes de la desalinización es muy superior al de los subterráneos. Incluso en zonas en las que la agricultura puede asumir el coste de la desalinización, existe un incentivo para optar por la extracción de aguas subterráneas a un menor coste. Mientras que el coste en baja de las aguas subterráneas en la cuenca del Segura está en el entorno de los 0,12-0,24 €/m³, el coste del agua desalinizada es muy superior. Al coste estimado por la Administración para la

producción de agua desalinizada ($0,34 \text{ €/m}^3$) (CHS, 2007) hay que añadirle los costes de elevación necesarios para llevar el agua hasta las zonas regables. Por ejemplo, el precio del agua de la planta desalinizadora de Valdelentisco para los regantes del Valle del Guadalentín sería de aproximadamente $0,50 \text{ €/m}^3$ (CHS, 2008a). El planteamiento actual de la Administración hidráulica es la simple permuta de caudales subterráneos por desalinizados, sin compensación alguna por la diferencia de coste entre ambos.

Capítulo III. Publicación 1

III.1. Resumen de la publicación

Título

El impacto económico de las pérdidas de agua por evaporación en los embalses de la cuenca del Segura, SE España

Referencia de la publicación

Martínez-Granados, D., Maestre-Valero, J.F., Calatrava, J. and Martínez-Álvarez, V. (2011). "The Economic Impact of Water Evaporation Losses from Water Reservoirs in the Segura Basin, SE Spain." *Water Resources Management* 25(13): 3153–3175.

Introducción

En este artículo se evalúa el impacto económico de las pérdidas por evaporación de agua en grandes embalses y pequeñas balsas de riego de la cuenca del Segura, en el sureste de España. Las pérdidas por evaporación en embalses reducen el elevado nivel de eficiencia en el uso del agua que se ha alcanzado mediante técnicas como la presurización de los sistemas tradicionales de transporte y distribución o el riego localizado, por lo que pueden tener un impacto económico significativo.

En climas áridos y semiáridos, las pérdidas por evaporación de agua en embalses pueden ser elevadas. Craig *et al.* (2005) estimaron que la evaporación anual procedente de pequeñas balsas de riego en Queensland, Australia, es de alrededor de 1.000 hm³, sobre una capacidad total de almacenamiento de 2.500 hm³. Según estos autores, este volumen de agua sería suficiente para abastecer unas 125.000 ha de cultivo, generando una producción anual con un valor de aproximadamente 375 M\$. Gökbülak y Özhan (2006) estimaron que la evaporación anual de los lagos y grandes embalses de Turquía es mayor que las extracciones de aguas subterráneas, superior al consumo de agua con fines domésticos e industriales, y equivalente a la quinta parte del agua aplicada a los regadíos del país. En la cuenca del Río Grande (EE.UU.), la evaporación en un embalse de tamaño medio (Elephant Butte) representa el 15-25%

del consumo de agua anual de la ciudad de Rio Grande en Nuevo México (Gupta *et al.*, 2002).

En España, Martínez-Álvarez *et al.* (2008) estimaron que la evaporación anual en las balsas de riego de la cuenca del Segura es aproximadamente de 58 hm³, lo que representa más del 8% del agua de riego utilizada en la cuenca durante el periodo de estudio. Tales pérdidas afectan a la eficiencia global de uso del agua, especialmente en la agricultura, contrarrestando los importantes esfuerzos realizados en las explotaciones agrarias para la incorporación de tecnologías eficientes de riego (goteo y micro-aspersión).

Los estudios referenciados ponen de manifiesto que las pérdidas por evaporación, tanto en grandes embalses como en pequeñas balsas de riego, pueden ser importantes. Por lo tanto, en regiones con escasez de agua es crucial evaluar dichas pérdidas y su impacto económico, cuestión que podría ayudar a optimizar la contabilidad y gestión de los recursos hídricos (Morton 1994; Stanhill 2002).

Puesto que el sector agrario es generalmente el más afectado por la escasez de agua, cualquier evaluación de alternativas para reducir las pérdidas por evaporación de agua debe tener en cuenta su impacto económico sobre la agricultura de regadío. Por ejemplo, Ward (1987) evalúa el impacto económico asociado al incremento de las pérdidas por evaporación de agua que se produce al programar desembalses de las presas del Río Chama de Nuevo México para satisfacer la demanda recreativa, encontrando que dicho impacto es menor que los beneficios derivados de los usos recreativos. Craig *et al.* (2005) proporcionan una estimación aproximada del valor de la producción agraria no generada como consecuencia de las pérdidas por evaporación en las balsas de riego de Queensland, Australia. No se han encontrado estudios hasta la fecha que evalúen el impacto de las pérdidas por evaporación en los grandes embalses y en las balsas de riego de las explotaciones desde una perspectiva económica y a escala de cuenca.

En este sentido, los objetivos principales de este estudio son: (i) evaluar el volumen de las pérdidas de agua por evaporación de los principales embalses en la cuenca del Segura (sureste de España), una zona mediterránea semiárida con un severo déficit hídrico, y (ii) evaluar sus impactos hidrológicos y económicos sobre la agricultura de regadío de la cuenca. Para lograr estos objetivos se propone el uso combinado de (i) datos de evaporación en tanque Clase-A y coeficientes de tanque específicos para evaluar tanto las pérdidas por evaporación en los grandes embalses

de la cuenca como en las pequeñas balsas de riego, y (ii) un modelo de programación matemática no lineal para evaluar el impacto económico de dichas pérdidas.

Metodología

Disponibilidad de Agua y Escenarios de evaporación

Los datos de disponibilidad de recursos hídricos utilizados son los oficiales para la cuenca del Segura (MMA, 2001; CHS, 2007). Sin embargo, estos datos actualmente representan una estimación meramente teórica que sólo se aplica con fines de planificación. Se basan en los flujos renovables anuales medios de los recursos hídricos para el período 1940-1996 (823 hm³/año; CHS, 2006) y en el supuesto de que el Acueducto Tajo-Segura (ATS) siempre transfiere a la cuenca del Segura la máxima dotación de agua establecida legalmente para el regadío (400 hm³/año). Sin embargo, este escenario de disponibilidad de agua tan optimista difiere de una realidad donde la disponibilidad de recursos es sensiblemente inferior, por lo que se considera un escenario de disponibilidad de agua más realista que denominamos "situación actual". La consideración de este escenario permite una evaluación más realista tanto de las pérdidas de agua por evaporación como de su impacto económico. Este escenario es equivalente a una reducción del 27,5% en la disponibilidad de agua en la cuenca con respecto a los datos oficiales de disponibilidad de agua (MMA, 2001; CHS, 2007), y se justifica por las siguientes circunstancias:

-El Acueducto Tajo-Segura (ATS) sólo suministra la mitad de la máxima dotación anual de agua transferible para el riego.

-La disponibilidad de recursos superficiales y subterráneos para el riego de la cuenca se reduce en un 20% con respecto a la disponibilidad teórica de agua considerada en las fuentes oficiales (MMA, 2001; CHS, 2007). Estas reducciones son equivalentes a considerar los flujos de agua medios para el período 1980-2005, que se estiman en 663 hm³/año en el Plan de Contingencia de Sequía de la cuenca del Segura (CHS, 2006).

El valor económico de las pérdidas por evaporación se calcula mediante un modelo de programación matemática que permite simular la asignación de agua y superficie entre los cultivos de regadío en la cuenca del Segura. Dicho modelo se ejecuta, en el escenario de escasez de agua considerado, bajo tres situaciones de evaporación diferentes:

A. Situación en la que no hay pérdidas de agua por evaporación ("escenario base de evaporación"). Equivale a añadir las pérdidas de agua en los grandes embalses al escenario de disponibilidad de agua "situación actual".

B. Situación en la que existen pérdidas por evaporación en los grandes embalses. Se corresponde con el escenario de disponibilidad de agua "situación actual".

C. Situación de las pérdidas en los grandes embalses y pequeñas balsas de riego. Las pérdidas en pequeñas balsas se restan del escenario de disponibilidad de agua "situación actual".

El escenario de evaporación de referencia (A) no es un escenario realista, pero se ha considerado como punto de referencia para compararlo con los escenarios B y C, en los que sí se consideran pérdidas por evaporación, y obtener así el valor económico asociado a dichas pérdidas. La diferencia entre el valor económico asociado a los escenarios de evaporación A y B es una medida del impacto de las pérdidas de agua por evaporación en los grandes embalses. La diferencia entre los escenarios de evaporación B y C es una medida del impacto de las pérdidas de agua por evaporación en las balsas de riego. La diferencia entre los escenarios de evaporación A y C es una medida del impacto conjunto de las pérdidas de agua por evaporación en los grandes embalses y las balsas de riego de la cuenca.

Otra aportación de este trabajo es que la disponibilidad de agua en las diferentes áreas de la cuenca se expresa tanto en términos de agua bruta (agua en los grandes embalses y acuíferos antes de ser transportada a las zonas regables) como de agua neta (en la cabecera de las redes de distribución que suministran agua a los regantes).

Cálculo de las pérdidas por evaporación

Existen varios métodos que permiten estimar la evaporación de los cuerpos de agua. En este estudio se ha considerado el uso de datos de evaporación en tanque Clase-A junto a coeficientes mensuales de tanque, como la mejor opción para estimar la evaporación en grandes embalses (Martínez-Álvarez *et al.*, 2008; Lowe *et al.*, 2009), ya que proporciona un nivel de precisión suficiente para una evaluación a gran escala y para la disponibilidad actual de datos. Los embalses de la cuenca del Segura tienen una superficie que oscila entre 0,2 y 15 km² y una capacidad de almacenamiento de 0,07 a 250 hm³. Para simplificar el análisis, en este estudio se han considerado los 14 embalses de mayor dimensión de los 33 existentes en la cuenca del Segura.

La evaporación anual en balsas de riego se ha calculado utilizando la metodología y la base de datos de balsas desarrolladas por Martínez-Álvarez *et al.* (2008). Según estos autores, existen aproximadamente 15.000 balsas de riego en la cuenca del Segura, con una superficie que oscila entre 0,1 y 3 hectáreas y una profundidad de entre 5 y 10 metros.

Valoración del uso del agua de riego en la cuenca

Existen numerosas metodologías alternativas para la valoración económica del agua en la agricultura de regadío (Young, 2005). De todos los métodos existentes, la modelización mediante programación matemática es la opción más eficiente para la modelización económica de la agricultura de regadío propuesta en este estudio, ya que es útil para determinar las funciones de demanda de agua en sistemas agrarios con más de un cultivo y requiere de menos datos que otros métodos más costosos (Young, 2005). De hecho, los modelos de optimización son los más utilizados para el cálculo de las funciones de demanda de agua en la agricultura (Bazzani *et al.*, 2005). Su principal ventaja es que el nivel de desagregación de la información técnica y económica (tipos de explotaciones, zonas de riego, cuencas, etc.) se puede adaptar tanto al requerido por el alcance del estudio como al permitido por la disponibilidad de datos. En concreto, las unidades espaciales de análisis consideradas en este trabajo son las 64 Unidades de Demanda Agraria (UDAs) definidas por la CHS (2007). El análisis a escala de UDA ofrece un equilibrio óptimo entre la complejidad del modelo y los requisitos técnicos y económicos del estudio. Esta escala de trabajo también permite una integración óptima de los resultados obtenidos ya sea para el análisis de gestión del agua o su aplicación posterior en modelos hidro-económicos. Por otra parte, las unidades de demanda agraria se pueden agregar para proporcionar resultados a nivel de grandes zonas hidrológicas.

El uso de la programación matemática permite estimar el impacto de los cambios en los parámetros técnicos y económicos utilizados en el modelo (dotación de agua, rendimiento de los cultivos, precios, tecnologías, costes de producción, etc.) sobre el valor del agua. En nuestro caso, se ha aplicado para simular el impacto de la reducción en el volumen del agua disponible en cada UDA debido a las pérdidas por evaporación, y obtener así el valor económico de dichas pérdidas.

La agricultura de regadío en la cuenca del Segura se simula mediante un modelo de programación que asigna la superficie regable y el agua disponible entre diferentes actividades de cultivo en cada una de los 64 unidades de demanda agraria de la cuenca.

La función objetivo maximiza la suma del margen neto para todas las actividades de cultivo de regadío seleccionadas en cada unidad de demanda agraria, estando sujeto a una serie de limitaciones que representan la disponibilidad de superficie regable y de agua.

El modelo ha sido calibrado usando la programación matemática positiva (PMP), un enfoque analíticamente formalizado por Howitt (1995), que es el método de calibración más ampliamente utilizado en la modelización económica agraria. La calibración con PMP hace que el modelo sea una representación más precisa de la realidad cuando no hay disponibilidad de datos a un nivel muy detallado. El enfoque PMP utiliza los datos de la distribución de cultivos realmente observada para calcular los coeficientes de una función cuadrática de costes para cada actividad de cultivo, funciones que se incorporan a la función objetivo del modelo inicial. El modelo calibrado proporciona resultados que son consistentes con las decisiones reales de los agricultores.

El modelo abarca treinta y cinco actividades de cultivos, que representan el 97% de la superficie de regadío de la cuenca. Sólo se consideran los cultivos que ocupan más del 1% de la superficie regada en todos los municipios de la cuenca. Los coeficientes técnicos y económicos utilizados en el modelo se han tomado o calculado a partir de datos de estadísticas y publicaciones oficiales e informes, así como de una encuesta realizada a agricultores durante el período 2009-2010. La información sobre superficies observadas de cultivo y disponibilidad de agua se definen a escala de UDA, mientras que los precios, los rendimientos de los cultivos, los costes de producción, el consumo de agua, etc., se establecen para áreas más grandes de la cuenca (generalmente, comarcal). Sin embargo, al calibrar el modelo utilizando las superficies de cultivo observadas, puede diferenciarse económicamente cada UDA.

El modelo se ejecuta para cada unidad de demanda agraria con el fin de determinar el área regada óptima asignada a cada cultivo en función del volumen disponible de agua en cada una de ellas. A partir de la asignación óptima de cultivos, se calculan los correspondientes margen neto total y valor de la producción agraria para cada UDA. La disponibilidad de agua se expresa en términos de agua bruta y neta utilizando índices de eficiencia técnica para el transporte y distribución que han sido obtenidos de MMA (2001) y de CHS (2007). De esta manera, el valor económico del agua se referencia tanto a la disponibilidad de agua bruta (para la valoración del uso del agua a nivel de la cuenca) como a la disponibilidad de agua neta (para la valoración del uso del agua en las explotaciones agrarias). Esta distinción es muy importante ya que

permite estimar el valor económico de las pérdidas de agua por evaporación en los grandes embalses (agua bruta) y pequeñas balsas de riego (agua neta).

Resultados

Según los resultados obtenidos, las pérdidas de agua por evaporación en las balsas de riego ascienden a 58,3 hm³/año y representan una reducción a nivel de “agua neta” del 6,3% con respecto al escenario base de evaporación (A). Dichas pérdidas triplican la evaporación en grandes embalses y equivalen a 66,94 hm³/año en términos de “agua bruta” que se dejarían de utilizar. Contrariamente a la evaporación en las balsas de riego, las pérdidas en los grandes embalses deben medirse en términos de “agua bruta”. Las pérdidas anuales de agua por evaporación en los grandes embalses ascienden a 23,67 hm³. Estas pérdidas representan una reducción en el volumen bruto de agua del 2,2% con respecto al escenario base de evaporación (A) y, en términos de “agua neta”, equivalen a 20,02 hm³ que no recibirían los agricultores para el riego de cada anualidad.

Por otro lado, las pérdidas de agua por evaporación para toda la cuenca se estiman en aproximadamente 81,96 hm³/año, esto es, la suma del agua bruta evaporada en los grandes embalses y el agua neta evaporada en las balsas de riego. En cuanto al agua que finalmente no se utiliza en las explotaciones agrarias asciende a 78,31 hm³/año. Este volumen de agua es similar a la suma de la demanda industrial (23 hm³/año) y la demanda medioambiental (60 hm³/año), y es equivalente al 34,8% de la demanda urbana. La evaporación anual de las masas de agua en la cuenca del Segura representa el 8,6% de los recursos hídricos disponibles para el regadío de la cuenca.

Las pérdidas de agua por evaporación en balsas de riego y grandes embalses se distribuyen de manera desigual en la cuenca. En el caso de las balsas de riego, las zonas que presentan menores pérdidas de agua son la Cabecera y zonas del Noroeste y las zonas del Altiplano y Margen izquierda, en concreto, 2,74 hm³/año y 5,63 hm³/año respectivamente (*i.e.* 2,21% y 7,36% de la disponibilidad de agua en el escenario base de evaporación). En contraposición, la zona de la Vega del Segura y las subcuencas costeras y Valle del Guadalentín mostraron las mayores pérdidas con 21,35 hm³/año y 28,57 hm³/año respectivamente (*i.e.* 5,04% y 10% de la disponibilidad de agua en el escenario base de evaporación). El 82,3% de las balsas de riego se encuentran localizadas en las dos últimas regiones, donde el riego es más intensivo y por lo tanto la cantidad de pérdidas de agua por evaporación es considerablemente mayor.

En general, el 43% de los 78,31 hm³ del total de pérdidas anuales por evaporación corresponde a la zona de la Vega del Segura y otro 43% a las subcuencas costeras y Valle del Guadalentín, las dos zonas más grandes de regadío en la cuenca y donde se encuentra la agricultura de regadío más intensiva y rentable. Estas pérdidas representan casi el 12% de la disponibilidad total de recursos hídricos para el riego en dichas zonas. La Cabecera y zonas del Noroeste y las zonas del Altiplano y Margen izquierda, sólo sufrieron un 6,7% y un 7,3% de dichas pérdidas respectivamente.

El impacto económico de las pérdidas por evaporación de agua en balsas de riego y embalses de la cuenca ha sido estimado en 134 M€, un 6,3% del valor de la producción agraria. Las pérdidas en los grandes embalses reducen el valor de la producción agraria en un 1,1% (24 M€), mientras que las pérdidas en las balsas de riego lo hacen en un 5,2% (110 M€). En términos de margen neto las pérdidas por evaporación generan una reducción del 5,4% (49 M€), donde 9 M€ corresponden a las pérdidas en grandes embalses y 40 M€ a las pérdidas en las balsas de riego. En términos de superficie regada se produce una reducción de 13.600 ha (7,5% de la superficie de regadío de la cuenca), 10.270 de ellas a causa de las pérdidas en las balsas de riego. En promedio, cada m³ evaporado en las balsas de riego genera unas pérdidas económicas un 85% mayores que cada m³ evaporado en los grandes embalses. Este impacto es más importante, en términos absolutos y relativos, en las zonas donde se encuentra la agricultura de regadío más intensiva y rentable. Este resultado lleva asociado un alto impacto en la gestión y planificación del agua que no es tenido en cuenta en la planificación hidrológica de la cuenca, ya que las pérdidas por evaporación en las balsas de riego no se consideran en su balance hídrico.

El desglose por zonas del impacto económico muestra unas pérdidas en grandes embalses de 2 M€ del valor de la producción agraria en las zonas del Altiplano y Margen izquierda, y en Cabecera y zonas del Noroeste de la cuenca. Por otra parte, en la zona de la Vega del Segura, donde se consume más del 60% del agua superficial y del ATS, las pérdidas por evaporación en los grandes embalses se traducen en una pérdida económica de 13 M€ en el valor de la producción agraria y de 5 M€ del margen neto. En las subcuencas costeras y Valle del Guadalentín las pérdidas de agua por evaporación en los grandes embalses generan un impacto de 9 M€ en el valor de la producción agraria y de 3 M€ en términos de margen neto.

Por otro lado, más del 60% de la pérdida económica asociada a las pérdidas por evaporación en las balsas de riego se concentra en las zonas costeras y en el Valle del Guadalentín (69 M€ en el valor de la producción agraria y 25 M€ del margen neto). El

resto corresponde en su mayor parte a la zona de la Vega del Segura (28 M€ en el valor de la producción agraria y 11 M€ del margen neto agrario) y en la zona del Altiplano y Margen izquierda (10 M€ en el valor de la producción agraria y 5 M€ del margen neto).

El 58,2% de los 134 M€ de las pérdidas en el valor de la producción agraria corresponde a las subcuencas costeras y Valle del Guadalentín y el 30,6% a la zona de la Vega del Segura. Las otras dos zonas de la cuenca sufren el 11,2% de dichas pérdidas. En cuanto a las pérdidas en términos de margen neto, los porcentajes para las diferentes zonas son casi idénticos. Sin embargo, en términos de reducción de superficie regada, el 43,6% de las 13.600 ha de disminución del regadío corresponde a la zona de las subcuencas costeras y Valle del Guadalentín, el 41% a la zona de la Vega del Segura, y el 9% a la zona del Altiplano y Margen izquierda.

Conclusiones

La combinación de los métodos para estimar la evaporación en masas de agua de distintas características y la modelización económica ha permitido evaluar el impacto económico de las pérdidas por evaporación en los grandes embalses y balsas de riego. Gracias al uso de modelos económicos matemáticos se logra una valoración más precisa del agua, ya que la disponibilidad de agua se considera explícitamente en esta valoración. Los resultados ponen de manifiesto que, puesto que el valor marginal del agua disminuye cuanto mayor es la disponibilidad de agua, el valor marginal del agua a nivel teórico de disponibilidad de agua (demandas de agua del PHN) sería inferior al valor marginal del agua en una situación de disponibilidad de recursos hídricos más realista, como la que hemos considerado

Las limitaciones de nuestro enfoque son las inherentes a las metodologías utilizadas tanto para la estimación de las pérdidas por evaporación en grandes embalses como para la valoración económica del agua de riego. Sin embargo, estas limitaciones se ven compensadas por el buen nivel de precisión que se consigue para una evaluación a una escala tan grande (nivel de la cuenca) y por el uso de datos hidrológicos y económicos provenientes de fuentes oficiales.

Las pequeñas balsas de riego permiten que los agricultores hagan frente, en cierta medida, a la baja garantía de suministro de agua que suelen tener, pero adolecen de sufrir mayores pérdidas por evaporación que los grandes embalses. El agua evaporada en las balsas de riego es más valiosa que el agua que se pierde en los grandes embalses, lo que se justifica por varias razones. En primer lugar, las balsas de

riego se encuentran principalmente en las zonas más rentables. Además, las pérdidas de agua en los grandes embalses ocurren antes de que el agua sea transportada a las zonas de regadío y, por tanto, se registran antes que las pérdidas en las balsas. Como el valor marginal del agua disminuye con su disponibilidad, el impacto económico específico (por m³) en una primera disminución en la disponibilidad de agua (pérdidas por evaporación en grandes embalses) es menor que dicho impacto en otra reducción ulterior (pérdidas por evaporación en balsas de riego). Por último, las pérdidas de agua en las balsas no es "agua bruta", sino un recurso que ya se ha distribuido a los agricultores, las pérdidas en el transporte y distribución ya se han producido, y por tanto la pérdida económica se atribuye al "agua neta".

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto la necesidad de tener en cuenta las pérdidas por evaporación en la gestión del agua ya que tienen importantes impactos hidrológicos y económicos. Estos impactos deben ser utilizados para evaluar adecuadamente las alternativas de gestión en los diferentes niveles: cuenca, comunidades de regantes y explotaciones. De esta manera se podrá contribuir a la mejora de la eficiencia técnica y económica de uso del agua, incluida la determinación de la viabilidad económica de las alternativas técnicas para la reducción de la evaporación, ya sea en los grandes embalses o en las pequeñas balsas de riego. Por último, no tener en cuenta las pérdidas por evaporación de las balsas de riego da como resultado una sobreestimación de las dotaciones realmente aplicadas a los cultivos en cualquier análisis económico de uso del agua, como las que se han llevado a cabo en el proceso de implementación de la Directiva Marco Europea del Agua.

Nuestros resultados pueden ser de utilidad para los gestores del agua y sistemas de riego colectivos de la cuenca del Segura, proporcionando información relevante para la planificación y gestión de los recursos hídricos en la misma. Además la propuesta metodológica utilizada se puede generalizar fácilmente a otras regiones con similares problemas climáticos y de gestión del agua. Las principales dificultades que puedan surgir se relacionan con la disponibilidad de datos detallados hidrológicos y económicos del área de estudio, tales como los registros de almacenamiento históricos en grandes embalses, las balsas de riego existentes en las explotaciones agrarias, la disponibilidad de agua por zonas diferenciadas, tanto a nivel de embalse como a nivel de la explotación agraria, y los datos económicos de la producción de cultivos, información esencial para construir un modelo para la valoración económica del agua.

Aunque este estudio se ha centrado en la evaluación del impacto actual hidrológico y económico de las pérdidas por evaporación en la cuenca del Segura, la

metodología aplicada también se puede utilizar para evaluar dicho impacto en escenarios de mayor escasez, tales como los proyectados a partir de las predicciones de cambio climático. En este caso sería de esperar que, al reducirse la disponibilidad de agua, el valor económico del agua evaporada se incremente, circunstancia que afectaría a la rentabilidad de las medidas para reducir la evaporación.

III.2. Copia de la publicación

Martínez-Granados, David, José Francisco Maestre-Valero, Javier Calatrava, and Victoriano Martínez-Álvarez. 2011. "The Economic Impact of Water Evaporation Losses from Water Reservoirs in the Segura Basin, SE Spain." *Water Resources Management* 25 (13): 3153–3175.

The economic impact of water evaporation losses from water reservoirs in the Segura basin, SE Spain

Martínez-Granados D., José Francisco Maestre-Valero, Javier Calatrava, Victoriano Martínez-Álvarez

Universidad Politécnica de Cartagena. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica. Paseo Alfonso XIII, 48. 30203 Cartagena. Spain.

Tel.: +34-968325906; Fax: +34-968325433; E-mail: j.calatrava@upct.es.

Abstract

In this paper we assess the economic impact of evaporation losses from great dams (GDs) and on-farm agricultural water reservoirs (AWRs) in the semi-arid Segura River basin, SE Spain. Evaporation losses from water reservoirs reduce the high water use efficiency reached in agriculture by means of other techniques such as well-built water pipes or drip irrigation and have a substantial economic impact. Evaporation losses have been calculated using Class-A pan evaporation data and pan coefficients, whereas their economic impact has been assessed using an economic mathematical programming model that simulates land and water allocation in the different irrigated areas of the basin. Our results show that annual evaporation from GDs and AWRs represents 8.7 % of the water currently available for irrigation in the Segura basin. The economic impact of such losses has been estimated in a reduction of 6.3 % of the value of agricultural production and 5.4 % of the farm net margin. As less water is effectively available for farmers the basin's irrigated area is reduced in a 7.5 %. This impact is greater, in both absolute and relative terms, in the areas accommodating the most intensive and profitable irrigated agriculture. The applied methodology and results could be useful to regional water agencies and collective irrigation schemes for future planning and management, including the assessment of alternatives for reducing evaporation from reservoirs.

Keywords: Water management; Small dams; Storage efficiency; Water economics; Economic value of water; Semi-arid climate.

Martínez-Granados, David, José Francisco Maestre-Valero, Javier Calatrava, and Victoriano Martínez-Álvarez. 2011. "The Economic Impact of Water Evaporation Losses from Water Reservoirs in the Segura Basin, SE Spain." *Water Resources Management* 25 (13): 3153–3175.

1. Introduction

Over the last few decades, agricultural, industrial and urban water demands have significantly increased in many countries, leading to shortages and fierce competition for water resources. In arid and semi-arid climates, such as the Mediterranean region, water scarcity poses a serious threat for agricultural production (Gleik, 1993; MED WS&D WG, 2007). The situation is predicted to worsen as a result of global climate change (IPCC, 2007). In this context of increasing scarcity, the allocation of water resources is likely to lead to potential conflicts among different users (Iglesias, 2009).

In arid and semi-arid climates, evaporation loss from water reservoirs can be potentially large. In Queensland, Australia, Craig et al. (2005) estimated that annual evaporation from on-farm storages was around $1,000 \times 10^6 \text{ m}^3$ for a total storage capacity of $2,500 \times 10^6 \text{ m}^3$. According to these authors, this amount of water is enough to irrigate about 125,000 ha and generate approximately US\$ 375 million worth of agricultural production annually. Gökbülak and Özhan (2006) estimated that annual evaporation from lakes and dams in Turkey is greater than the amount of groundwater pumped. They also reported that more water is lost by evaporation than is used for domestic and industrial purposes, a quantity greater than one fifth of irrigation water use. In the Rio Grande basin (USA), evaporation from a mid-sized reservoir (Elephant Butte) accounts for 15-25 % of the Rio Grande (New Mexico) water consumption allotment each year (Gupta et al., 2002). Particularly, Martínez-Alvarez et al. (2008) estimated the annual evaporation from on-farm reservoirs in the Segura basin at around $58.3 \times 10^6 \text{ m}^3$, more than 8 % of irrigation water use in the basin. Such a loss affects the overall water use efficiency, especially in agriculture, where it counterbalances most of the gains derived from the generalized application of efficient on-farm irrigation technologies (drip and micro-sprinkling). The above results highlight that the evaporative losses from water storages at both the farm and the regional scales can be large. In regions facing water shortages, it is thus crucial to assess such losses and its economic impact, what might help to optimize water resources surveying and management (Morton, 1994; Stanhill, 2002).

Martínez-Granados, David, José Francisco Maestre-Valero, Javier Calatrava, and Victoriano Martínez-Álvarez. 2011. "The Economic Impact of Water Evaporation Losses from Water Reservoirs in the Segura Basin, SE Spain." *Water Resources Management* 25 (13): 3153–3175.

As the agricultural sector is usually the sector most affected by water shortages, any assessment of alternatives to reduce water evaporation losses should consider the economic impact on irrigation. Ward (1987) assesses the economic impact of water evaporation losses from large dams in New Mexico's Rio Chama that result from increasing stream flows to satisfy recreational demands. He found their impact to be much lower than the benefits from recreational uses. Craig et al. (2005) provide a rough estimate of the foregone value of agricultural production due to evaporation losses in on-farm irrigation reservoirs in Queensland, Australia. To our knowledge, no detailed studies assessing the impact of evaporation losses in dams and on-farm irrigation reservoirs from an economic perspective and at the basin level have been published to date.

These considerations underpin the main goals of the presented study: (i) to assess the volume of water loss from evaporation from the main surface water storages in the

Segura basin (southeast Spain), a semi-arid Mediterranean area with a severe water deficit, and (ii) to evaluate their hydrological and economic impacts on the basin's irrigated agriculture. To achieve these goals we propose the combined use of water balance methods to assess evaporation losses from both great dams and on-farm reservoirs and non-linear mathematical programming modelling to evaluate the economic impact of such losses.

2. The Segura Basin

2.1. Physical environment and agriculture

The Segura basin is located in the southeast of the Iberian Peninsula (Fig. 1). It covers an area of approximately 18,870 km² (3.7 % of the total extension of Spain) spanning four different regions (Murcia, Andalusia, Castile La Mancha and Valencia Community). Its population in 2009 was approximately 2 x 10⁶ inhabitants, 4.14 % of the Spanish population, with a marked upward trend (CHS, 2007).

The Mediterranean climate of the Segura basin is characterized by a severe dry summer followed by sporadic intense rains in autumn. Inter-annual droughts are also

Martínez-Granados, David, José Francisco Maestre-Valero, Javier Calatrava, and Victoriano Martínez-Álvarez. 2011. "The Economic Impact of Water Evaporation Losses from Water Reservoirs in the Segura Basin, SE Spain." *Water Resources Management* 25 (13): 3153–3175.

common. Average rainfall is 400 mm year⁻¹, with a high inter-annual variability and large differences across the basin. Average temperature ranges from 10° C to 18° C, reaching maximum temperatures of 40° C. Class-A pan evaporation in the basin ranges from 1,600 mm to 2,000 mm (Martínez-Alvarez et al., 2007).

The Segura basin is a predominantly agricultural region, where approximately 52.1 % of its area is either cultivated or uncultivated agricultural land. Although the total potentially irrigable area in the basin is 389,256 ha, a maximum of 269,022 ha are effectively irrigated (69.1 %) (CHS, 2007). The irrigated area has doubled over the last 30 years, exacerbating the basin's traditional water scarcity situation and generating a severe overdraft problem in many aquifers (Molina et al., 2009). The agricultural sector is very important to the basin's economy, both in terms of production, employment and exports (Albiac et al., 2006). The value of agricultural production in the Segura basin depends basically on irrigated agriculture, mainly vegetables (41 %), citrus fruit (16 %), temperate climate fruit trees (13 %) and grape (12 %).

2.2. Segura basin water budget

Water scarcity is especially severe in the Segura basin (southeast Spain). Its semi-arid climate, combined with an intense expansion of the irrigated area over the last 30 years, has caused a dramatic water deficit. Irrigation currently represents 80 % of total water consumption in the basin (CHS, 1998).

The regional water agency (named CHS; acronym for Confederación Hidrográfica del Segura) is responsible for water planning and management, including any resources transferred from other basins. According to the Segura Basin Hydrological Plan (CHS, 1998), available water resources in the basin are 1,500 x 10⁶ m³ year⁻¹ (Fig. 2). Surface water accounts for 42.7 % of the total water resources. Groundwater from the numerous extant aquifers supplies approximately 14.7 % of the basin's water resources (MMA, 2001). Water reuse (6.7 %) comes mostly from the purification of urban wastewater. Finally, water is usually transferred from the Tajo basin in central Spain to the Segura basin by means of the Tajo-Segura Aqueduct (TSA) (36.2 %), which is a 300 km long channel. Evaporation losses from great dams, as well as water spilled to the sea from both rivers and coastal aquifers, are not included in the above estimation of the available resources (CHS, 1998 and 2007).

Martínez-Granados, David, José Francisco Maestre-Valero, Javier Calatrava, and Victoriano Martínez-Álvarez. 2011. "The Economic Impact of Water Evaporation Losses from Water Reservoirs in the Segura Basin, SE Spain." *Water Resources Management* 25 (13): 3153–3175.

These available water resources are not enough to satisfy the water demand in the Segura basin for all uses (estimated at approximately $1,960 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ year}^{-1}$). Thus, there is a structural water deficit in the basin of close to $460 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ year}^{-1}$ (Fig. 2). This deficit is covered by non-renewable groundwater pumping ($230 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ year}^{-1}$) and with a deficit application of water to crops, which are in many cases subject to water stress conditions, estimated at $230 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ year}^{-1}$. For this reason, real gross agricultural water demand considered by the CHS is $1,432 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ year}^{-1}$, instead of the theoretical gross agricultural water demand of $1,660 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ year}^{-1}$ considered in the official water budget shown in Fig. 2, whereas net demand (water that is effectively received on the farm) is $1,224 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ year}^{-1}$ (MMA, 2001).

This unbalance between the basin's resources and demands is caused by the huge increase of irrigation schemes developed over the last few decades, based on very optimistic expectations about the yearly amount of water that would be transferred from the Tajo basin. Initially, when the Tajo-Segura aqueduct was designed, an annual water transfer from the Tajo basin of $1000 \times 10^6 \text{ m}^3$ was planned, although once it was built only $540 \times 10^6 \text{ m}^3$ ($400 \times 10^6 \text{ m}^3$ for agriculture uses) were finally approved to be transferred every year (MMA, 2001). In practice, as a consequence of the frequent drought periods in Spain, much less water volumes have been transferred with large inter-annual variations (for example, average annual water transferred for irrigation between 1979 and 2009 was $198 \times 10^6 \text{ m}^3$). Without these transferred resources, the basin's deficit would near $1,000 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ year}^{-1}$. This uncertainty, related to the characteristics of the Segura basin water resources system and to its dependence on the highly variable resources transferred through the TSA, stresses that efforts to increase agricultural water management efficiency are crucial (Bouwer, 2000).

Martínez-Granados, David, José Francisco Maestre-Valero, Javier Calatrava, and Victoriano Martínez-Álvarez. 2011. "The Economic Impact of Water Evaporation Losses from Water Reservoirs in the Segura Basin, SE Spain." *Water Resources Management* 25 (13): 3153–3175.

2.3. Water Reservoirs

Agricultural water reservoirs (AWRs) for irrigation are small- to medium-sized reservoirs characterized by a moderate surface area (from 0.1 to 3 ha) and a low depth (from 5 to 10 m). They consist of earthworks embankments with waterproof membranes to prevent seepage losses. AWRs, which are filled with water from irrigation distribution systems, belong to private farmers and collective irrigation schemes and are built on private plots far from the rivers, creeks and streams. Irrigation distribution systems in the area of study are usually organized on a rota basis and therefore water is not always delivered to the farm on time to meet the crop water requirements. AWRs are typically used in southeast Spain and other regions across the world to solve this problem and to cope with the variable water allotments and periods without supply, guaranteeing water all year round (Daigo and Phaovattana, 1999; Martínez-Alvarez et al., 2006; Ali et al., 2008). According to Martínez-Alvarez et al. (2008) there are more than 1.5×10^4 AWRs in the Segura basin. Their spatial distribution is shown in Fig. 3.

Great dams (GDs), which are owned and managed by the CHS, are large-sized instream reservoirs built for the abstraction and long-term storage of water resources. These reservoirs are characterized by having a large surface area and being very deep. In the Segura basin, the surface area of the 33 extant GDs ranges from 2 to 1,500 ha with a storage capacity from 0.07 to 250×10^6 m³. In this study we consider the largest 14 dams in the Segura basin, whose location is shown in Fig. 3. Maximum surface area and volume for each of these GD are shown in Table 1.

2.4. Watershed Partition (Study Areas)

The CHS divides the basin, for water planning and management purposes, into 64 agricultural water demand units. Agricultural water demand units are characterized by their location and the water resources that they use (CHS, 2007). Both the estimation of evaporation losses and the economic valuation of water have been performed at the water demand unit level. With a view to simplifying the analysis and presentation, however, the results have been aggregated for both the whole basin and considering four main areas (Fig. 3): 1) Eastern Highlands and Creeks; 2) Coastal Areas and the Guadalentín Valley; 3) Upper Basin and Western Highlands; 4) Segura River Valley.

Martínez-Granados, David, José Francisco Maestre-Valero, Javier Calatrava, and Victoriano Martínez-Álvarez. 2011. "The Economic Impact of Water Evaporation Losses from Water Reservoirs in the Segura Basin, SE Spain." *Water Resources Management* 25 (13): 3153–3175.

Intensive export-oriented horticulture is located in the coastal areas and the Guadalentín River Valley. Fruit production, mostly citrus, peach and grape, is located in both coastal areas and the traditional and new irrigated areas of the Segura River Valley. Irrigation in the Upper Basin and Western Highlands produces more extensive crops (almond trees and cereals) but also some specialty crops. In the Eastern Highlands and Creeks, irrigation is mostly linked to the production of wine grapes but also to other fruit trees.

3. Methodology, data and assumptions

3.1. Water availability and evaporation scenarios

This section describes both the scenario of average water resources availability in the different areas of the basin and the three evaporation scenarios used in the assessment of the impact of evaporation losses. The more recent official data on the irrigated area and water demand in each area of the basin (MMA, 2001) are shown in Table 2. Water demand is expressed in terms of both gross or raw water (water in the reservoirs and aquifers prior to being transported to the irrigated areas) and net water (at the head of the farm's distribution networks). Table 3 shows gross agricultural water demand disaggregated by the water source. This official data for water resources availability comes from the Spanish National Hydrological Plan (PHN) (MMA, 2001) and is merely theoretical, serving only for planning purposes. They are based on the average annual renewable water resources inflows for 1940-1996 ($823 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ year}^{-1}$ according to CHS, 2006) and assume that the TSA always transfers its maximum legal water allotment ($400 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ year}^{-1}$). However, this optimistic water availability scenario never occurs. For this reason, a more realistic water availability scenario, called "current situation scenario", is considered for both the estimation of evaporation losses and for the economic valuation of such losses (Table 4). Percentages in last row of Table 4, which depict the "current situation" water availability scenario, multiply the agricultural water demand values for each water source in Table 3. Consideration of this scenario affords a more realistic assessment of water losses and their economic impact. As the marginal value of water decreases with water availability, water would be undervalued if rated at the theoretical level of water availability in MMA (2001) compared with a more

Martínez-Granados, David, José Francisco Maestre-Valero, Javier Calatrava, and Victoriano Martínez-Álvarez. 2011. "The Economic Impact of Water Evaporation Losses from Water Reservoirs in the Segura Basin, SE Spain." *Water Resources Management* 25 (13): 3153–3175.

realistic situation of scarcity. This scenario is equivalent to a 27.5 % reduction in water availability in the basin with respect to the theoretical PHN scenario (MMA, 2001).

The percentages in Table 4 were obtained from hydrological and water availability data from the Segura River Basin Authority (CHS, 2006). Specifically, the "current situation" water availability scenario assumes that (Table 4):

- The Tajo-Segura Aqueduct (TSA) only serves half of its maximum annual transferable water allotment for irrigation (the average amount of water effectively transferred for irrigation by the TSA);
- The availability of both surface and groundwater resources for irrigation from the basin are reduced by 20 % with respect to the theoretical water availability in the 2001 National Hydrologic Plan (PHN) (MMA, 2001). These reductions are equivalent to the average water inflows for the 1980-2005 period estimated at $663 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ year}^{-1}$ in the Segura Basin Drought Contingency Plan (CHS, 2006).
- No reduction is considered in water availability from desalinization and treated wastewater sources. These two sources do not present significant variations. In the case of treated wastewater sources, these come from domestic users, which present quite stable annual levels of water consumption.

The economic value of the evaporation losses is calculated by running the programming model described in section 3.3.1. It simulates irrigated agriculture in the Segura basin for three different evaporation scenarios in the considered water scarcity scenario:

- A. Situation where there are no evaporation water losses ("Baseline evaporation scenario"). Water losses from GDs are added to the gross water demands under the "current situation" water availability scenario. Evaporation losses from GDs are specifically calculated for each scarcity scenario as shown in section 3.2.2.
- B. Situation with evaporation losses in GDs: gross water demands (Values in Table 3 multiplied by percentages in last row of Table 4).
- C. Situation with losses from both GDs and AWRs. These losses are subtracted

Martínez-Granados, David, José Francisco Maestre-Valero, Javier Calatrava, and Victoriano Martínez-Álvarez. 2011. "The Economic Impact of Water Evaporation Losses from Water Reservoirs in the Segura Basin, SE Spain." *Water Resources Management* 25 (13): 3153–3175.

from gross water demands under the "current situation" water availability scenario. They are estimated using the methodology proposed by Martínez-Alvarez et al. (2008), as shown in section 3.2.1.

The reference evaporation scenario (A) is not a realistic scenario but has been considered as a benchmark to compare it with scenarios B and C in which losses from great dams exist and obtaining an economic value for the evaporation losses from GDs. The difference of the economic values associated with evaporation scenarios A and B is a measure of the impact of water evaporation losses from GDs. The difference between evaporation scenarios B and C is a measure of the economic impact of water evaporation losses from AWRs. The difference between evaporation scenarios A and C is a measure of the impact of water evaporation losses from both GDs and AWRs.

3.2. Calculating evaporation losses

A wide variety of methods are advisable to estimate evaporation from water bodies. Class-A pan evaporation data (E_p) has been considered in this study as the most suitable way to estimate evaporation from open water reservoirs (Martínez-Alvarez et al., 2008; Lowe et al, 2009), as it provides a sufficient level of accuracy for a large-scale assessment and for the current availability of data. This method is commonly used to derive the evaporation rate (E) of a water surface for hydrological applications (Linsley et al., 1992), or to derive the reference crop evapotranspiration rate (ET) for agricultural and irrigation purposes (Doorenbos and Pruitt, 1977; Allen et al., 1998; López-Urrea et al., 2006). For both applications, an empirical pan coefficient (K_p , defined as the ratio of E or ET to E_p) is used to estimate either E or ET . Martínez-Alvarez et al. (2007) established the annual and the monthly Class-A pan coefficients for AWRs in the Segura basin. They indicate that the annual K_p value is strongly dependent on the flooded AWR area (S) and loosely dependent on depth, D , whereas the monthly K_p value mostly depended on D and is slightly influenced by S (Hounam, 1973; Martínez-Alvarez et al., 2007). Témez (2007) established the monthly Class-A pan coefficients for GDs in Spain and identified a monthly K_p variation throughout the year (Table 5).

Martínez-Granados, David, José Francisco Maestre-Valero, Javier Calatrava, and Victoriano Martínez-Álvarez. 2011. "The Economic Impact of Water Evaporation Losses from Water Reservoirs in the Segura Basin, SE Spain." *Water Resources Management* 25 (13): 3153–3175.

3.2.1. Calculating evaporation losses in agricultural water reservoirs

The annual evaporation from AWRs (E_{AWR}) is estimated using the AWRs database and methodology proposed by Martínez-Alvarez et al. (2008). The AWRs database used was built by Martínez-Alvarez et al. (2008) who identified more than 1.5×10^4 AWRs covering 4,901 ha in the Segura basin by photo-interpreting the 2003 SIGPAC aerial orthophoto (Fig. 3). The floodable area of the reservoirs, S_{max} , has been digitalized as the inner perimeter of each AWR. It represented 0.26 and 1.92 % of the whole basin and the irrigated land, respectively. AWRs spatial distribution along the basin is characterized by a decreasing coverage density (expressed as the proportion of irrigated land that is occupied by AWRs) with respect to the distance from the coast. The highest density of coverage with AWRs (about 2.91 % of the irrigated area) is found in the coastal irrigated areas and in the Guadalentín Valley (south and southeast of the basin) where irrigated agriculture is most intensive.

It is usual in southeast Spain to maintain the water level in the AWRs above one third of their total depth throughout the year to insure against the uncertain and poorly timed delivery of water. For this reason, a floodable area corresponding to two thirds of its total depth ($S_{2/3}$) is considered in this study as a realistic value for determining the average evaporative area. Results of the annual E_{AWR} are aggregated at different scales (whole basin and areas of the study) in order to analyse the spatial distribution of the annual E_{AWR} .

3.2.2. Calculating evaporation losses in Great dams (GDs)

In this study we use the CHS dams database that provides the following data: (1) the cartography (available at <http://www.chsegura.es/>), which is used in GIS software to define the geometric characteristics of the extant GDs, (2) the water height-surface-volume relation (bathymetric curve) for each GD and (3) detailed information regarding the daily volume for each GD during the period from 2000 to 2008, which is used to determine the daily flooded area of each GD. To simplify the analysis, the 14 most important dams in the Segura basin have been identified from the extant 33 GDs. The location of these 14 dams is shown in Fig. 3. The selected GDs cover 6,198 ha (93 % of the total covered area by GDs, and 0.33 and 2.42 % of the whole basin and irrigated

Martínez-Granados, David, José Francisco Maestre-Valero, Javier Calatrava, and Victoriano Martínez-Álvarez. 2011. "The Economic Impact of Water Evaporation Losses from Water Reservoirs in the Segura Basin, SE Spain." *Water Resources Management* 25 (13): 3153–3175.

land, respectively) and have a total storage volume of $1,181 \times 10^6 \text{ m}^3$ (96 % of the basin's total storage capacity). Maximum surface area and volume for each GD are shown in Table 1. GDs can be found all over the basin, although the majority are located along the Segura River.

To estimate the annual evaporation from GDs (E_{GD}), Class-A pan evaporation (E_p) data recorded next to each GD had to be characterized. Most of the Class-A pans located in the agro-climatic stations next to the GDs in the Segura basin had maintenance problems or sensor failures and thus collected data are not completely reliable. To solve this problem, E_p data are obtained from the monthly Class-A pan evaporation (E_{p_m}) maps proposed by Martínez-Alvarez et al. (2008) for the Segura basin. Annual evaporation (E_{GD}) is estimated as follows:

(1): Monthly pan evaporation (E_{p_m}) (mm day^{-1}) for each GD is obtained using overlapping techniques between the E_{p_m} GIS raster coverage and each GD.

(2): Monthly pan evaporation coefficients (K_{p_m}) proposed by Témez (2007) for GDs located in Spain are adopted (Table 5).

(3): Daily flooded area (S) (m^2) of each GD is determined from the daily volume data provided by the CHS.

(4): Daily evaporation (E_{dGD}) (m^3) for each GD is estimated from equation (1):

$$E_{dGD} = K_{p_m} E_{p_m} S \quad (1)$$

(5): Monthly E_{mGD} (m^3) for each GD is estimated as the sum of the daily data.

(6): Annual E_{GD} is obtained from the sum of the E_{mGD} . The average value of E_{GD} for the studied period is considered in the analysis. Lastly, results are aggregated on different scales (whole basin and study areas) in order to analyse the spatial distribution of the annual E_{GD} .

Martínez-Granados, David, José Francisco Maestre-Valero, Javier Calatrava, and Victoriano Martínez-Álvarez. 2011. "The Economic Impact of Water Evaporation Losses from Water Reservoirs in the Segura Basin, SE Spain." *Water Resources Management* 25 (13): 3153–3175.

3.3. Valuing agricultural water use

3.3.1. Modelling the economic use of water in irrigation

There are numerous alternative methodologies for economically valuing water in irrigated agriculture (Young, 2005). Of all the existing methods, we decided that mathematical programming is the most efficient option for economically modelling irrigated agriculture in this study, since it is useful for determining water demand functions in agricultural systems with more than one crop and requires fewer data than other more costly methods (Young, 2005). In fact, optimization models are the most used approach for calculating water demand functions in agriculture (Bazzani et al., 2005). Their main advantage is that technical and economic information can be entered at the level of disaggregation (farm types, irrigated areas, basins, etc.) required by the scope of the study or permitted by the availability of data. Specifically, our spatial units of analysis are the 64 agricultural water demand units defined by the CHS (1998). The analysis at the water demand unit level affords an optimal trade-off between model complexity and the technical and economic information requirements. It also enables an optimum integration of the model's results for the analysis of water management and its use in hydro-economic models. Moreover, water demand units can be aggregated to provide results for larger hydrological areas.

Using mathematical programming we can also estimate the impact of changes in the technical and economic parameters used in the model (water availability, crop yields, prices, technologies or production costs, etc.) on the value of water. In our case, it is used to simulate the impact of the reduction in the volume of water available in each water demand unit caused by evaporation losses, and thus to obtain the economic value of such losses.

Irrigated agriculture in the Segura basin is simulated using a programming model that allocates the irrigable area among different crop activities in each of the 64 agricultural water demand units. The objective function (NM) maximizes the sum of the net margin for all the irrigated crop activities selected in each water demand unit, being subject to a number of constraints that represent the availability of irrigated land and water. In a stylized manner, the model for each water demand unit is given by the following expression:

Martínez-Granados, David, José Francisco Maestre-Valero, Javier Calatrava, and Victoriano Martínez-Álvarez. 2011. "The Economic Impact of Water Evaporation Losses from Water Reservoirs in the Segura Basin, SE Spain." *Water Resources Management* 25 (13): 3153–3175.

$$\text{Maximize } NM = \sum_j s_j [p_j \cdot q_j + sub_j - c_j] \quad (2)$$

Subject to the following constraints:

$$\text{Land availability: } \sum_j s_j \leq SF \quad (3)$$

$$\text{Water availability: } \sum_j (s_j \cdot a_j) \leq A \quad (4)$$

$$\text{Non-negativity: } s_j \geq 0 \quad \forall j \quad (5)$$

Where: j is a set that denotes the crop ($j=1, \dots, 35$); s_j is the decision variable of the model that represents the irrigated area allocated to crop j in the water demand unit (hectares); p_j is the price of crop j (euros/kg or euros/unit); q_j is the average yield of crop j in the water demand unit (kg/ha or units/ha); a_j is the net per hectare water demand of crop j in the water demand unit (m^3/ha); c_j is the average per hectare production cost for crop j in the agricultural water demand unit (euros/ha); sub_j is the average per hectare subsidy to crop j (euros/ha); SF is the irrigable area in the agricultural water demand unit (hectares); A is the net water availability for the agricultural water demand unit (m^3). It must be noted that there are 64 different sets of data, one for each model and water demand unit.

The constraint in Eq. 3 prevents more land than available from being cultivated. The constraint in Eq. 4 prevents the volume of water used by all crops from exceeding the available water supply for each water demand unit. Evaporation losses reduce the value of the parameter A in Eq. 4. Finally, non-negativity constraints (Eq. 5) prevent the model from assigning negative values to the area allocated to each crop (s_j).

The model has been calibrated using positive mathematical programming (PMP), an approach analytically formalized by Howitt (1995), which is the most widely used calibration method in agricultural economic modelling. Calibration using PMP makes the model a more accurate representation of the real system when no data are available at

Martínez-Granados, David, José Francisco Maestre-Valero, Javier Calatrava, and Victoriano Martínez-Álvarez. 2011. "The Economic Impact of Water Evaporation Losses from Water Reservoirs in the Segura Basin, SE Spain." *Water Resources Management* 25 (13): 3153–3175.

a very detailed level. The PMP approach uses data on the observed selection of crop activities of farmers to calculate the coefficients of a quadratic cost function for each crop activity that is added to the initial objective function model. The calibrated model provides results that are consistent with the farmers' observed real decisions.

Specifically, we use the PMP calibration approach proposed by Röhm and Dabbert (2003). This allows for some degree of substitution between crops that have similar economic and technological characteristics (i.e. cereals, leaf vegetables, legumes, etc.) to obtain a quadratic cost function for each crop and water demand unit.

To obtain the observed distribution of crop activities in each water demand unit, we have introduced the observed crop areas by municipalities in the Segura River Basin Authority's geographical information system (available at www.chsegura.es) and crossed them with the distribution of water demand units per municipalities. To improve the robustness of the model, we have also used information on the land rental value for calibration following the approach proposed by Gohin and Chantreuil (1999).

After calibration, the final calibrated PMP model would be:

$$\text{Maximize } NM = \sum_j \sum_g s_{gj} \left[p_{gj} \cdot q_{gj} + sub_{gj} - \alpha_{gj} - \frac{1}{2} \beta_{gj} s_{gj} - \frac{1}{2} \gamma_g \sum_j s_{gj} \right] \quad (6)$$

Subject to the following constraints:

$$\text{Land availability: } \sum_j \sum_g s_{gj} \leq SF \quad (7)$$

$$\text{Water availability: } \sum_j \sum_g (s_{gj} \cdot a_{gj}) \leq A \quad (8)$$

$$\text{Non-negativity: } s_{gj} \geq 0 \quad \forall g, j, \quad (9)$$

Where: j is a set that denotes the crop ($j=1, \dots, 35$); g is a set that denotes the group of similar crops to which the crop j belongs to ($g=1, \dots, 26$); s_{gj} is the decision variable of the model that represents the irrigated area allocated by the model to crop j in the agricultural water demand unit (hectares); p_{gj} is the price of crop j (euros/kg or euros/unit); q_{gj} is the average yield of crop j in the water demand unit (kg/ha or units/ha); a_{gj} is the net per hectare water demand of crop j in the agricultural water demand unit (m^3/ha); sub_{gj} is the average per hectare subsidy for crop j (euros/ha); SF is the irrigable

Martínez-Granados, David, José Francisco Maestre-Valero, Javier Calatrava, and Victoriano Martínez-Álvarez. 2011. "The Economic Impact of Water Evaporation Losses from Water Reservoirs in the Segura Basin, SE Spain." *Water Resources Management* 25 (13): 3153–3175.

area in the agricultural water demand unit (hectares); A is the net water availability for the agricultural water demand unit (m^3). Last, α_{gj} , β_{gj} and γ_g are the coefficients of the quadratic cost function for each crop that substitutes to the average per hectare production costs for crop j (c_j) after the calibration procedure. They have been calculated as in Röhm and Dabbert (2003).

The model is run for each agricultural water demand unit to determine the optimal irrigated area allocated to each crop depending on the available volume of water in each one (parameter A in equation (8)). A total net margin and market value of production are estimated for the water demand unit from the optimal crop allocation. Water availability

is expressed in terms of both gross/raw water and net water using technical efficiency indexes for water transportation and distribution that have been taken from MMA (2001). This way, the economic value of water can be referenced to both the gross water availability (for the valuation of water management at the basin level) and the net water availability (for the valuation of on-farm water management). This distinction is very important as we are estimating the economic value of water losses in GDs (gross or raw water) and in AWRs (net water).

3.3.2. Technical and economic data used in the economic model

The technical and economic coefficients used in the model have been taken or calculated using data from official statistics and publications and reports, as well as from a survey of farmers conducted during 2009-2010. The model is adapted, data availability permitting, to the characteristics of each of the study areas. Information on crop areas and water availability is organized at the water demand unit level, whereas prices, crop yields, production costs, water consumption, etc., are set out for larger areas of the basin. However, by calibrating the model using the observed crop acreage we are able to further differentiate each water demand unit economically.

The model covers thirty-five crop activities ($j=35$), accounting for 97 % of the irrigated area of the basin. Only crops that occupy more than 1 % of the area irrigated in all municipalities of the basin are considered. Average crop yields (q_j , q_{gj}) have been taken from Segura et al. (2006), De Juan et al. (2003) and the farm survey. Per hectare

Martínez-Granados, David, José Francisco Maestre-Valero, Javier Calatrava, and Victoriano Martínez-Álvarez. 2011. "The Economic Impact of Water Evaporation Losses from Water Reservoirs in the Segura Basin, SE Spain." *Water Resources Management* 25 (13): 3153–3175.

crop water requirements (a_j , a_{gj}) have been taken from Villalobos et al. (2006), De Juan et al. (2003), CREA (2005) and Segura et al. (2006). Average crop prices (p_j , p_{gj}) for 1998-2009 have been calculated with data supplied by Murcia Regional Government (CREM, 2009), which are representative of the entire basin.

Average per hectare production costs (c_j) have been calculated based on studies of the economics of crop production developed by the Ministry of Agriculture (MAPA, 2005, 2006a, 2006b and 2006c) and on Segura et al. (2006) and De Juan et al. (2003). Production costs include the cost of acquiring water calculated using the average price paid by farmers per m³ of irrigation water from each source, which has been obtained from the Segura River Basin Authority (CHS, 2007). We have used the same cost items as the Ministry of Agriculture (MAPA, 2005, 2006a, 2006b and 2006c). This way, direct costs, machinery costs, paid labour costs, indirect costs and depreciations are subtracted from farm revenue to obtain the net margin. The calculated net margins vary for the different areas: first, crop yields and therefore revenues are different for each area; second, certain cost items depend on crop yields and charges paid for irrigation water in each area.

The irrigable area (SF) for each agricultural water demand unit have been taken from MMA (2001). The net water availability (A) comes from the different water availability and evaporation scenarios described in section 3.1. Lastly, as previously commented, the coefficients of the quadratic cost function of each crop (α_{gj} , β_{gj} , γ_g) in the final calibrated model are obtained in the calibration procedure.

4. Results

4.1. Evaporation assessment

4.1.1. Evaporation for the whole basin

The three first columns in Table 6 show water availability for irrigation in the Segura basin under the three water evaporation scenarios considered (A, B and C). Water availability is presented in both gross or raw water and net water terms. The difference between the first and second columns is a measure of the evaporation losses from GDs, whereas the difference between the second and third columns is the

Martínez-Granados, David, José Francisco Maestre-Valero, Javier Calatrava, and Victoriano Martínez-Álvarez. 2011. "The Economic Impact of Water Evaporation Losses from Water Reservoirs in the Segura Basin, SE Spain." *Water Resources Management* 25 (13): 3153–3175.

evaporation losses from AWRs. Evaporation from AWRs amounted to $58.30 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ year}^{-1}$ (Table 6) and accounted for a reduction in the net volume of water used of 6.4 % with respect to the baseline evaporation scenario (A), where no evaporation losses exist. This amount corresponds to a mean annual evaporation rate of 1.404 m over the flooded area in the basin. In terms of "raw water", this is equivalent to $66.94 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ year}^{-1}$ that are not used for production.

Contrarily to evaporation from AWRs, losses from GDs must be measured in terms of "raw water". The annual evaporation water losses from GDs calculated from Eq. (1) are $23.67 \times 10^6 \text{ m}^3$. This accounted for a reduction in the gross volume of water used of 2.2 % with respect to the baseline evaporation scenario (A), and, in terms of net water, is equal to $20.02 \times 10^6 \text{ m}^3$ that are not received by farmers for irrigation every year. Water transferred from GDs to farms suffers from transportation losses and thus the water that is physically evaporated from GDs (gross or raw water) is greater than the corresponding water volume that is finally not applied to crops (net water).

Strictly speaking, evaporation water losses for the whole basin are estimated at approximately $81.96 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ year}^{-1}$, that is, the sum of the raw water evaporated from GDs and the net water evaporated from AWRs (Table 6). In terms of the water that is finally not used at the farm level, losses amount to $78.31 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ year}^{-1}$ (Table 6). This water volume is almost equal to the sum of industrial demand ($23 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ year}^{-1}$) and the environmental demand ($60 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ year}^{-1}$), and is equivalent to 34.8 % of the urban demand. Annual evaporation represents approximately 8.6 % of the currently estimated water consumption for irrigation.

4.1.2. Evaporation by areas

Annual evaporation loss from AWRs and GDs, which is unevenly distributed across the basin, is calculated individually for each selected area in the study. Results are shown in Table 6 that only presents the results by areas measured in terms of net water use.

For AWRs, the Upper Basin and Western Highlands and the Eastern Highlands and Creeks are the areas that are found to have a lower quantity of water loss, amounting

Martínez-Granados, David, José Francisco Maestre-Valero, Javier Calatrava, and Victoriano Martínez-Álvarez. 2011. "The Economic Impact of Water Evaporation Losses from Water Reservoirs in the Segura Basin, SE Spain." *Water Resources Management* 25 (13): 3153–3175.

to 2.74×10^6 and $5.63 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ year}^{-1}$ (2.21 and 7.36 % of water availability in the baseline evaporation scenario, respectively), whereas the Segura River Valley and the Coastal Sub-Basins and Guadalentín Valley showed the highest evaporation values, 21.35×10^6 and $28.57 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ year}^{-1}$ (5.04 and 10.00 % of water availability in the baseline evaporation scenario (A) respectively). A total of 82.3 % of the AWRs are located in the latter two regions, where irrigation is most intensive irrigation and thus the amount of evaporation water losses are considerably higher.

Overall, 43 % of the $78.32 \times 10^6 \text{ m}^3$ of total annual evaporation losses correspond to the Segura River Valley and another 43 % to the Coastal Sub-Basins and Guadalentín Valley, the two largest irrigated regions in the basin. The Upper and Western Basin and the Eastern part of the Basin suffer 7.3 % and 6.7 % of such losses respectively. However, in relative terms, the most affected areas are the Coastal Sub-Basins and the Guadalentín Valley, where the most intensive and profitable agriculture is located, and where total losses are nearly 12 % of their total available irrigation water resources.

4.2. Economic value of evaporation losses

4.2.1. Economic value for the whole basin

Evaporation losses result in a 6.3 % reduction in the market value of foregone agricultural production of the basin (134 million euros), as shown in Table 7. Losses from GDs reduce the value of agricultural production by 1.1 % (24 million euros), whereas losses from AWRs reduce output by a 5.2 % (110 million euros). If we measure their impact in terms of foregone net margin, evaporation losses result in a 5.4 % reduction of farm net margin (49 million euros), where 9 million euros corresponds to losses from GDs and 40 million euros to losses from AWRs (Table 7).

If we compare Tables 6 and 7 we find that, in relative terms, the economic impact is slightly smaller than the reduction in irrigation water availability, as the reduced water availability leads to a decrease in the area growing less profitable crops. In that sense, evaporation losses result in about 13,600 hectares not being cultivated (7.5 % of the basin's irrigated area), 10,270 hectares because of losses in AWRs.

Martínez-Granados, David, José Francisco Maestre-Valero, Javier Calatrava, and Victoriano Martínez-Álvarez. 2011. "The Economic Impact of Water Evaporation Losses from Water Reservoirs in the Segura Basin, SE Spain." *Water Resources Management* 25 (13): 3153–3175.

Apart from being larger in both absolute and relative terms, water evaporated from AWRs is also more valuable than water lost from GDs. At the basin level, water evaporated from GDs causes an average loss of 1.014 euros m⁻³ of production and 0.380 euros m⁻³ of net margin, whereas water evaporated from AWRs causes a loss of 1.887 euros m⁻³ of production and 0.686 euros m⁻³ of net margin. There are several reasons for this. First, AWRs are mostly located in the most profitable areas. Second, water losses from GDs happen before water is transported to the irrigated areas and distributed to the farms and are thus accounted for before losses from AWRs. As the marginal value of water decreases with water availability, the "per m³" economic impact of a first reduction in water availability (evaporation losses from GDs) is less than the "per m³" impact of another reduction that takes place afterwards (evaporation losses from AWRs). Last, water lost from AWRs is not raw/gross water but a resource that has already being distributed to farmers, losses in transportation and distribution have occurred, and therefore the economic loss is attributable to net water.

4.2.2. Economic value of water evaporation by areas

Table 7 and Fig. 4 show the results of the economic impact of evaporation losses disaggregated by areas of the basin both in absolute and relative terms respectively. The impact of evaporation losses from GDs has been measured in the areas where water stored in dams is finally used, regardless of where they are located. Consequently, evaporation losses from GDs have barely any impact on those areas that receive little water from the main basin regulation system or the TSA (the Eastern Highlands and Creeks and the Upper Basin and Western Highlands). The economic value of water losses from GDs in these two areas accounts only for 2 million euros of marketed agricultural production. On the other hand, in the Segura River Valley, where more than 60 % of surface and TSA water is consumed, evaporation losses from GDs result in an economic loss of 13 million euros of agricultural production and 5 million euros of net margin. In the Coastal Sub-Basins and Guadalentín Valley, evaporation losses from GDs result in an economic loss of 9 million euros of agricultural production and 3 million euros of net margin.

On the other hand, more than 60 % of the economic loss associated with evaporation losses from AWRs is concentrated in the Coastal Areas and Guadalentín

Martínez-Granados, David, José Francisco Maestre-Valero, Javier Calatrava, and Victoriano Martínez-Álvarez. 2011. "The Economic Impact of Water Evaporation Losses from Water Reservoirs in the Segura Basin, SE Spain." *Water Resources Management* 25 (13): 3153–3175.

Valley (69 million euros of production and 25 million euros of net margin). The remainder corresponds mostly to the Segura River Valley (28 million euros of production and 11 million euros of net margin) and the Eastern Highlands and Creeks (10 million euros of production and 5 million euros of net margin).

In relative terms, the impact of evaporation losses from AWRs in terms of the marketed value of production ranges from 1.5 % in the Upper Basin and Western Highlands to 6.5 % in the Coastal Sub-Basins and Guadalentín Valley. In terms of farm net margin, it ranges from 1.2 % in the Upper Basin and Western Highlands to 5.4 % in the Coastal Sub-Basins and Guadalentín Valley.

Overall, 58.2 % of the 134 million euros of lost agricultural production corresponds to the Coastal Sub-Basins and Guadalentín Valley, and 30.6 % to the Segura River Valley. The other two areas of the basin together suffer 11.2 % of such losses. In terms of foregone net margin, percentages for the different areas are almost identical. However, in terms of agricultural land left uncultivated, 43.6 % of the 13,600 uncultivated hectares corresponds to the Coastal Sub-Basins and Guadalentín Valley, 41.0 % to the Segura River Valley and 9.0 % to the Eastern Highlands and Creeks.

In relative terms, the area most affected in economic terms by evaporation losses is again the Coastal Sub-Basins and the Guadalentín Valley, where total economic impact amounts to a 7.4 % reduction in the value of agricultural production, a 6.1% reduction in farm net margin and a 11.3 % reduction in the cultivated area (Fig. 4).

5. Options to reduce evaporative losses

Water managers should look for ways to improve the efficiency of water supply systems to ensure that the maximum socio-economic benefit is derived from water use. The results in this paper do emphasise the need for managers and planners to consider options to reduce the economic impact of water evaporation losses in water-stressed regions such as the Segura Basin.

A wide range of methods and techniques has been proposed to reduce evaporation losses from water reservoirs (Brown, 1988). However, most of them have not proved to be effective because of their high costs, the difficulties in their practical

Martínez-Granados, David, José Francisco Maestre-Valero, Javier Calatrava, and Victoriano Martínez-Álvarez. 2011. "The Economic Impact of Water Evaporation Losses from Water Reservoirs in the Segura Basin, SE Spain." *Water Resources Management* 25 (13): 3153–3175.

implementation or their low efficiency under natural working conditions. The most reliable ones can be classified in three groups: management, structural and chemical methods.

Management methods entail specific operational actions in the reservoirs led to lower the surface water temperature or the evaporating area. Examples are: (i) using first the water of reservoirs with the highest temperature, (ii) reducing the surface area to volume ratio by concentrating the stored water and, (iii) in conjunctive use of surface and groundwater, using first the surface resources to minimise the exposure area and time of the evaporating surface. Other more drastic options are to modulate the amount of water allocation as a function of the estimated evaporation, or to avoid water storage during the most demanding periods (summer), especially in areas with the highest evaporation rates.

Structural methods include installing suspended or floating protective covers over the reservoirs to minimize energy and mass exchanges between the water surface and the atmosphere. The use of suspended shade-cloth covers appears feasible and efficient in small reservoirs up to 300 m span, allowing a reduction in evaporation of 70–90% without significant technical or maintenance problems (Craig et al., 2005; Martínez-Álvarez et al., 2006). A high reduction in evaporation can be also achieved using protective floats or floating covers, which reduce water loss in proportion to the protected surface area (Craig et al., 2005; Segal and Burstein, 2010). However, they suffer from a significant risk of damage due to wind dragging and biofilms growing on their moist inner surfaces. Another interesting but less effective options are tree-lined shelters or windbreaks that protect the water body from wind (Hipsey and Sivapalan, 2003).

Lastly, chemical methods mainly involve the use of monolayers, which spontaneously self-spread over the water surface and create a film one molecule thick. Monolayers are a low-cost measure well suited to small and midsize reservoirs (up to 10 ha), but they usually provide a moderate reduction in evaporation (10–40%) and are still under experimental development (Craig et al., 2005; Barnes, 2008).

The most effective actions that could be undertaken by regional water agencies, collective irrigation schemes and farmers for lowering the evaporation depend on the water management level considered. First, at the basin level, we consider mainly operational methods focused on the management of great dams and major

Martínez-Granados, David, José Francisco Maestre-Valero, Javier Calatrava, and Victoriano Martínez-Álvarez. 2011. "The Economic Impact of Water Evaporation Losses from Water Reservoirs in the Segura Basin, SE Spain." *Water Resources Management* 25 (13): 3153–3175.

transportation and allocation network structures, such as the commented above. These methods should be assessed using dynamic long-term water allocation models (Karimi and Ardakanian, 2010) or allocation optimization models (Liu et al., 2010; Zhang et al., 2010) that incorporate both the effect of evaporation losses and the assessment of its socio-economic impact. Besides, it is important to reduce the high uncertainty caused by random water supply, especially from water transferred from other basins, in order to avoid the need for large buffer reservoirs to regulate the uneven supply of water. Along those lines, the recent legislative changes in Spain that allow for the temporary trading of water concessions between users in a same or different basin, are an interesting option for improving water supply reliability, and should be further promoted in the future (Garrido and Calatrava, 2009).

The second level of irrigation water management involves the collective irrigation schemes, which have intermediate infrastructures for medium-term storage of allotted water and its later distribution to farms, generally organised on a rota basis. Reducing evaporation in this management level should be tackled through improvements in their water distribution systems to allow for a continuous supply that best matches the requirements of modern high-frequency irrigation systems and remove the need for on-farm AWRs. Additionally, specific technologies such as shading covers or wind-shelters must be implemented to reduce evaporation from their AWRs.

The third management level is related to on-farm water storage and application to crops. The need of farm scale AWRs should be avoided using the aforementioned solutions at upper management levels. The massive building of on-farm AWRs must be also controlled through stronger regulations and monitoring by public water agencies, promoting the construction of shared storages that have a smaller surface area to volumen ratio. In addition, specific technologies must be implemented to reduce evaporation in the extant AWRs. From these methods, the use of suspended shade-cloth covers has begun to be applied and promoted in the Segura Basin by means of government subsidies and demonstrations to farmers. The decision to implement this kind of technologies under the particular conditions of a farm must be based on a cost/benefit analysis, but few studies have been devoted to determining the economic viability of such investments (Martínez-Alvarez et al., 2009; Craig et al. 2005). The methodology used in this study can be adapted in this sense: The extent of the reduction

Martínez-Granados, David, José Francisco Maestre-Valero, Javier Calatrava, and Victoriano Martínez-Álvarez. 2011. "The Economic Impact of Water Evaporation Losses from Water Reservoirs in the Segura Basin, SE Spain." *Water Resources Management* 25 (13): 3153–3175.

in evaporation achieved with a specific technology can be valued using the economic model and such value compared with the cost of implementing it.

6. Conclusions

AWRs are a provision that help farmers to cope to some extent with low water supply reliability, but they suffer from greater evaporation losses than GDs, which offset most of the gains derived from the widespread use of more efficient irrigation techniques that are generalized in the Segura basin. In this paper we present an original and useful analysis of the evaporation losses from GDs and AWRs in the Segura basin and assess their economic impact using several indicators.

Estimated annual evaporation from water reservoirs in the Segura basin represents 8.7 % of the water resources currently available for irrigation. Water losses from AWRs tripled evaporation from GDs. Moreover, water evaporated from AWRs is also more valuable than water lost from GDs. On average, each m³ evaporated from AWRs generates an economic loss that is 85 % greater than that of each m³ evaporated from GDs.

The economic impact of evaporation losses from water reservoirs has been estimated at 6.3 % of the value of marketed agricultural production, 5.4 % of the farm net margin and 7.5 % of the irrigated area. Overall, evaporation losses from AWRs in the basin had a higher economic impact than evaporation losses from GDs, which they nearly quadrupled. This has a high impact on water management and planning, as evaporation losses from AWRs are not taken into account in the basin's water planning or incorporated in its water budget. Regardless of the indicator considered, the greatest economic impact of evaporation losses, in both absolute and relative terms, corresponds to areas where the most intensive and profitable irrigated agriculture is located.

The combination of water balance methods and economic modelling allows the efficient assessment of the economic impact of evaporation losses from both GDs and AWRs on irrigation. A more accurate valuation of water is achieved thanks to the use of mathematical economic models, as water availability is explicitly considered in this valuation. As the value of water decreases with water use, water that is valued at the theoretical level of water availability (the National Hydrological Plan water demands)

Martínez-Granados, David, José Francisco Maestre-Valero, Javier Calatrava, and Victoriano Martínez-Álvarez. 2011. "The Economic Impact of Water Evaporation Losses from Water Reservoirs in the Segura Basin, SE Spain." *Water Resources Management* 25 (13): 3153–3175.

would be worth less than in a more realistic situation, such as the one we have considered. The limitations of our approach are those inherent to the methodologies used for both the estimation of evaporation losses from great dams and for the economic valuation of irrigation water. However, these limitations are surpassed by the sound level of accuracy that they allow for an assessment at such a large scale (basin level) and by the use of official hydrologic and economic data.

Our results could be useful to water agencies and collective irrigation schemes in the Segura basin for future planning and management, but can also be relevant to other regions with similar climate and water management problems. First, they highlight the need to take into account evaporation losses in water management as they have important hydrological and economic impacts. These impacts must be assessed and used to properly evaluate management alternatives at different levels (basin, irrigated areas and farms) to improve the technical and economic efficiency of water use, including the economic viability of technical alternatives for reducing evaporation from reservoirs. Lastly, not accounting for evaporation losses from AWRs results in overestimates in any economic analysis of water use, such as those carried out within the implementation process of the European Water Framework Directive.

The proposed methodology can be applied to other regions. The main difficulties that may arise are related to the availability of detailed hydrological and economic data on the area of study, such as historical storage records in great dams, extant on-farm reservoirs surface area, water availability per areas differentiated at both the reservoir and the farm level and data on the economics of crop production to build a model for the economic valuation of water.

Although this study focused on the assessment of the current hydrological and economic impact of evaporation losses on the Segura basin, the applied methodology can also be used to evaluate such impact under scenarios of increased scarcity, such as those coming from climate change predictions. It is expected that, as water availability is reduced, the economic value of evaporated water will increase, thus affecting the profitability of measures to reduce evaporation.

Martínez-Granados, David, José Francisco Maestre-Valero, Javier Calatrava, and Victoriano Martínez-Álvarez. 2011. "The Economic Impact of Water Evaporation Losses from Water Reservoirs in the Segura Basin, SE Spain." *Water Resources Management* 25 (13): 3153–3175.

7. Acknowledgements

The authors wish to thank two anonymous referees for their valuable comments and suggestions that have greatly improved this manuscript. The authors acknowledge the Fundación Séneca (Murcia, Spain) for the financial support of part of this study through the research project 02978/PI/05. Some of the technical and economic data used comes from a survey of farmers done by Javier Calatrava Leyva and financed by the Spanish Government through the DESEM project (AGL2006-12293-C02-02/AGR). During the elaboration of this research David Martínez-Granados had a research grant financed by the European Commission within the IRRIVAL project (STREP FOOD-023120).

8. References

- Albiac J, Hanemann M, Calatrava J, Uche J, Tapia J (2006) The rise and fall of the Ebro water transfer. *Nat. Resour. J.* 46(3): 727-757.
- Ali S, Ghosh NC, Singh R (2008) Evaluating best evaporation estimate model for water surface evaporation in semi-arid region, India. *Hydrol Process* 22: 1093-1106.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage N° 56, FAO, Rome.
- Barnes GT (2008) The potential for monolayers to reduce the evaporation of water from large water storages. *Agric. Water. Manage.* 95:339–353.
- Bazzani GM, Pasquale SD, Gallerani V, Morganti S, Raggi M, Viaggi D (2005) The sustainability of irrigated agricultural systems under the Water Framework Directive: first results. *Environ. Model. and Softw.* 20:165–175.
- Bouwer H (2000) Integrated water management: emerging issues and challenges. *Agric. Water Manage.* 45:217-228.
- Brown JAH (1988). The potential for reducing open water evaporation losses: a review. *Proceedings of the Hydrology and Water Resources Symposium, Canberra, Australia.* pp. 108-115.
- CHS (1998) Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura: Memoria. Confederación Hidrográfica del Segura, Murcia, Spain.
- CHS (2006). Plan de Actuación en Situaciones de Alerta y Eventual Sequía en la Cuenca del Segura. Confederación Hidrográfica del Segura, Murcia, Spain.

Martínez-Granados, David, José Francisco Maestre-Valero, Javier Calatrava, and Victoriano Martínez-Álvarez. 2011. "The Economic Impact of Water Evaporation Losses from Water Reservoirs in the Segura Basin, SE Spain." *Water Resources Management* 25 (13): 3153–3175.

- CHS (2007) Estudio General sobre la Demarcación Hidrográfica del Segura. Confederación Hidrográfica del Segura, Murcia, Spain.
- Craig I, Green A, Scobie M, Schmidt E (2005) Controlling Evaporation Loss from Water Storages. NCEA Publication No. 1000580/1, Queensland, Australia.
- CREA (2005). Análisis del uso del agua en situaciones de sequía: "Riegos de socorro" en cultivos leñosos de la Región de Murcia. Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), Universidad de Castilla La Mancha, Albacete, Spain.
- CREM (2009) Anuario Estadístico de la Región de Murcia. Centro Regional de Estadística de Murcia, Murcia, Spain.
- Daigo K, Phaovattana V (1999) Evaporation and percolation control in small farm ponds in Thailand. *JARQ-Japan Agricultural Research Quarterly* 33:47-56.
- De Juan JA, Ortega JF, Tarjuelo JM (2003) Sistemas de cultivo: Evaluación de itinerarios técnicos. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid
- Doorenbos J, Pruitt WO (1977) Guidelines for predicting crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 24, FAO, Rome.
- Garrido, A. and Calatrava, J. (2009). "Trends in water pricing and markets". In Garrido, A. and Llamas, M.R. (eds.) "Water Policy in Spain", CRC Press, Taylor & Francis, Leiden, The Netherlands. Pp 129-142.
- Gleick P (ed) (1993). *Water in crisis: A guide to the world's fresh water resources*. Oxford University Press, Oxford, United Kingdom.
- Gohin A, Chantreuil F (1999) La programmation mathématique dans les modèles d'exploitation agricole. Principes et importance du calibrage. *Cahiers d'Economie et Sociologie Rurale* 52:59-77.
- Gökbulak F, Özhan S (2006) Water loss through evaporation from water surfaces of lakes and reservoirs in Turkey. *E-Water: Official Publication of the European Water Association* [on line]. <http://www.ewaonline.de>. ISSN 1994-8549.
- Gupta V, Tadros M, Bradshaw RW, Showalter SK, Miller JE, Evans L, Sasaki DY (2002). Progress Report: Advanced Concepts Group Fy01-1362-LDRD, Solutions to National and Global Security Issues Based on Limited Freshwater Resources. SAND2002-0781. Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.
- Hipsey MR, Sivapalan M., 2003. Parameterizing the effect of a wind shelter on evaporation from small water bodies. *Water Resour. Res.* 39(12): 1339-1348.
- Hounam CE (1973) Comparison between Pan and Lake Evaporation. WMO Technical

Martínez-Granados, David, José Francisco Maestre-Valero, Javier Calatrava, and Victoriano Martínez-Álvarez. 2011. "The Economic Impact of Water Evaporation Losses from Water Reservoirs in the Segura Basin, SE Spain." *Water Resources Management* 25 (13): 3153–3175.

Note 126, WMO, Geneva.

Howitt RE (1995) Positive Mathematical Programming. *Am. J. Agr. Econ.* 77:329-342.

Iglesias A (2009) Policy issues related to climate change in Spain. In Dinar A and Albiac A (eds.), *Policy and strategic behaviour in water resource management*. Earthscan, London

IPCC (2007) Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report: *Climate Change 2007*. <http://www.ipcc.ch>. Accessed 26 July 2010.

Karimi A, Ardakanian R (2010) Development of a Dynamic Long-Term Water Allocation Model for Agriculture and Industry Water Demands. *Water Resour. Manage.* 24:1717–1746.

Linsley RK, Kohler MA, Paulhus JLH (1992) *Hydrology for Engineers*, 3rd edn. McGraw-Hill, New York.

Liu D, Chen X, Lou Z (2010) A Model for the Optimal Allocation of Water Resources in a Saltwater Intrusion Area: A Case Study in Pearl River Delta in China. *Water Resour. Manage.* 24:63–81.

López-Urrea R, Martín de Santa Olalla F, Fabeiro C, Moratalla A (2006). Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. *Agr. Water Manage.* 85:15-26.

Lowe LD, Webb JA, Nathan RJ, Etchells T, Malano HM (2009). Evaporation from water supply reservoirs: An assessment of uncertainty. *J. Hydrol.* 376:261–274.

MAPA (2005). *Análisis de la economía de los sistemas de producción: Resultados técnico-económicos de explotaciones agrícolas de Castilla-La Mancha*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid.

MAPA (2006a). *Análisis de la economía de los sistemas de producción: Resultados técnico-económicos de explotaciones agrícolas de Andalucía*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid.

MAPA (2006b). *Análisis de la economía de los sistemas de producción: Resultados técnico-económicos de explotaciones hortofrutícolas de la Región de Murcia*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid.

MAPA (2006c). *Análisis de la economía de los sistemas de producción: Resultados técnico-económicos de explotaciones hortofrutícolas de la Comunidad Valenciana*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid.

Martínez-Granados, David, José Francisco Maestre-Valero, Javier Calatrava, and Victoriano Martínez-Álvarez. 2011. "The Economic Impact of Water Evaporation Losses from Water Reservoirs in the Segura Basin, SE Spain." *Water Resources Management* 25 (13): 3153–3175.

Martínez-Alvarez V, Baille A, Molina Martínez JM, González-Real MM (2006) Efficiency of shading materials in reducing evaporation from free water surfaces. *Agr. Water Manage.* 84:229-239.

Martínez-Alvarez V, González-Real MM, Baille A, Molina Martínez JM (2007) A novel approach for estimating the pan coefficient of irrigation water reservoirs. Application to South Eastern Spain. *Agr. Water Manage.* 92:29-40.

Martínez-Alvarez V, González-Real MM, Baille A, Maestre Valero JF, Gallego Elvira B (2008) Regional Assessment of Evaporation from Agricultural Irrigation Reservoirs in a Semiarid Climate. *Agr. Water Manage.* 95:1056-1066.

Martínez-Alvarez V, Calatrava J, Maestre Valero JF, Martín-Górriz B (2009) Economic assessment of shade-cloth covers for agricultural irrigation reservoirs in a semi-arid climate. *Agric. Water. Manag.* 99:1351–1359.

MED WS&D WG (2007). Mediterranean water scarcity and drought report.

Mediterranean water scarcity & drought working group, European Commission Technical Report 009-2007. www.emwis.net/topics/WaterScarcity.

MMA (2001) Plan Hidrológico Nacional. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.

Molina J, García Aróstegui J, Benavente J, Varela C, de la Hera A, López Geta J (2009) Aquifers Overexploitation in SE Spain: A Proposal for the Integrated Analysis of Water Management. *Water Resour. Manage.* 23(13):2737-2760.

Morton FI (1994). Evaporation research - a critical review and its lessons for the environmental sciences. *Crit. Rev. Env. Sci. Tec.* 24:237-280.

Röhm O, Dabbert S (2003) Integrating Agri-Environmental Programs into Regional Production Models: An Extension of Positive Mathematical Programming. *Am. J. Agr. Econ.* 85(1): 254-265.

Segal L, Burstein L (2010) Retardation of Water Evaporation by a Protective Float. *Water Resour. Manage.* 24:129–137.

Segura P, García A, Costantini B (2006). Estudio técnico-económico de los procesos de producción agrícola y de transformación de las principales orientaciones hortofrutícolas de la Región de Murcia. Asociación Murciana de Organizaciones de Productores Agrarios (AMOPA), Murcia, Spain.

Stanhill G (2002). Is the Class-A evaporation pan still the most practical and accurate meteorological method for determining irrigation water requirements? *Agr. Forest*

Martínez-Granados, David, José Francisco Maestre-Valero, Javier Calatrava, and Victoriano Martínez-Álvarez. 2011. "The Economic Impact of Water Evaporation Losses from Water Reservoirs in the Segura Basin, SE Spain." *Water Resources Management* 25 (13): 3153–3175.

Meteorol. 112:233-236.

Témez JR (2007) Consideraciones prácticas sobre la evaporación en los embalses de la España peninsular. *Revista de Obras Públicas* 3476:15 – 22.

Villalobos FJ, Orgaz F, Fereres E (2006) Estudio sobre necesidades de agua de riego de los cultivos en la zona del trasvase Tajo-Segura. Informe realizado para SCRATS. IAS-CSIC & Universidad de Córdoba, Córdoba, Spain.

Ward FA (1987) Economics of Water Allocation to Instream Uses in a Fully Appropriated River Basin: Evidence from a New Mexico Wild River. *Water Resour. Res.* 23:381-392.

Young RA (2005) Determining the economic value of water: Concepts and Methods. RFF Press, Washington.

Zhang W, Wang Y, Peng H, Li Y, Tang J, Benjamin K (2010) A Coupled Water Quantity–Quality Model for Water Allocation Analysis. *Water Resour. Manage.* 24:485–511.

Martínez-Granados, David, José Francisco Maestre-Valero, Javier Calatrava, and Victoriano Martínez-Álvarez. 2011. "The Economic Impact of Water Evaporation Losses from Water Reservoirs in the Segura Basin, SE Spain." *Water Resources Management* 25 (13): 3153–3175.

Figures

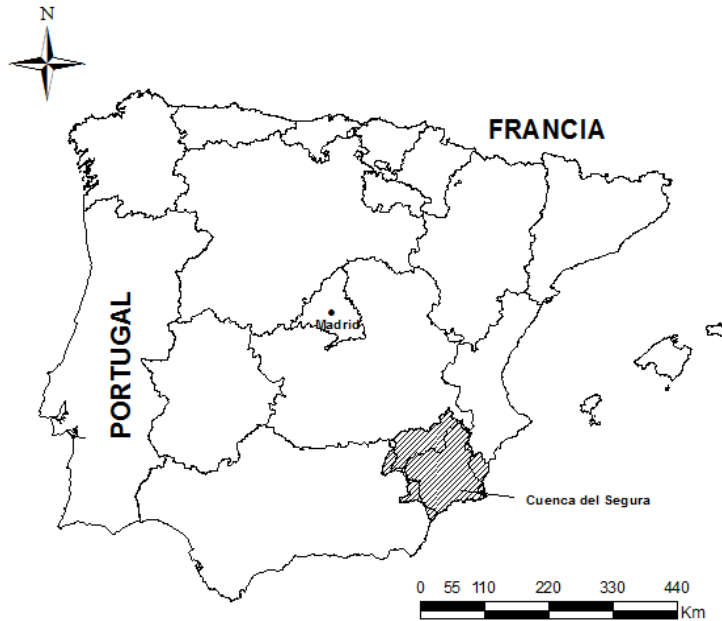


Fig. 1 Location of the Segura basin in southeast Spain

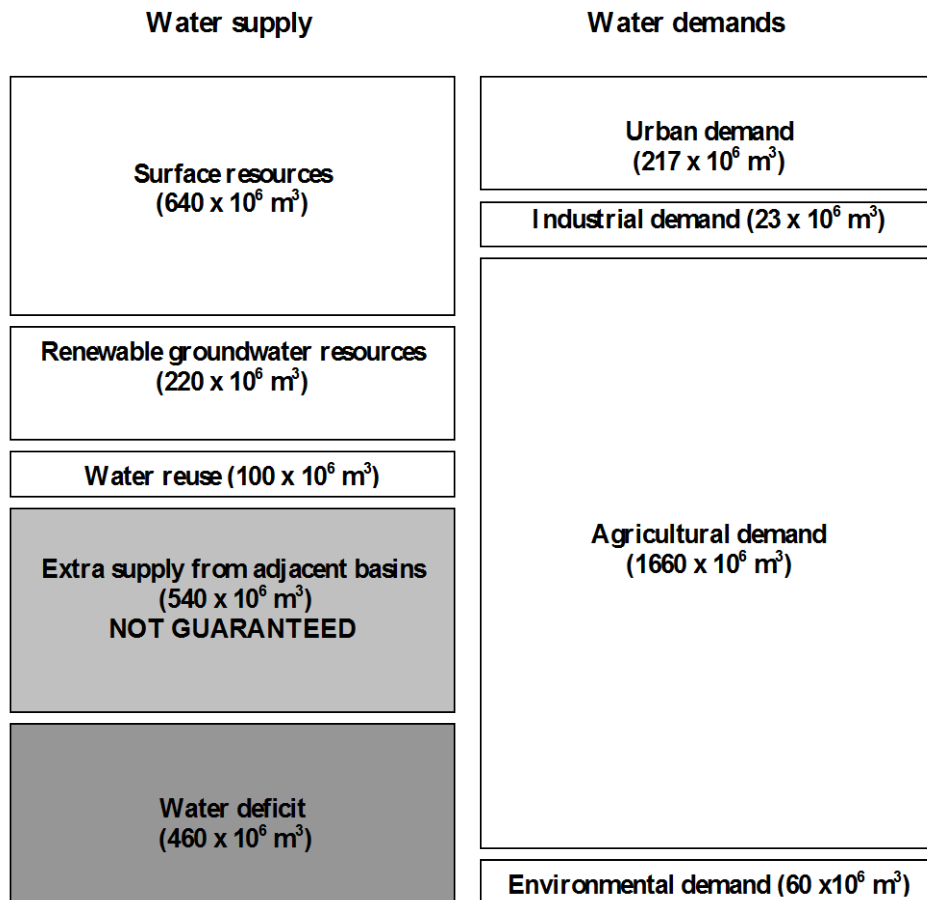


Fig. 2 Segura basin water budget (CHS, 1998)

Martínez-Granados, David, José Francisco Maestre-Valero, Javier Calatrava, and Victoriano Martínez-Álvarez. 2011. "The Economic Impact of Water Evaporation Losses from Water Reservoirs in the Segura Basin, SE Spain." *Water Resources Management* 25 (13): 3153–3175.

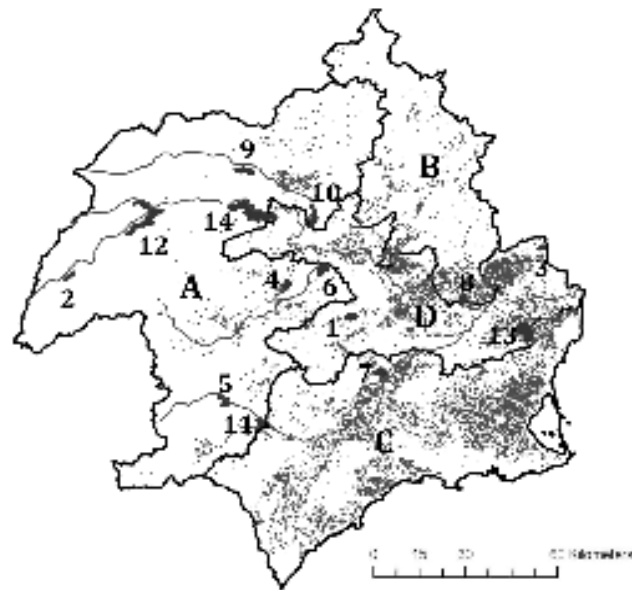


Fig. 3 Spatial distribution of GDs, AWRs, main rivers and areas of the Segura basin considered for the aggregation of results. Numeration of GDs corresponds with Table 1. Capital letters correspond with areas of the basin. A: Upper Basin and Western Highlands; B: Eastern Highlands and Creeks; C: Coastal Areas and Guadalentín Valley; and D: Segura River Valley.

Martínez-Granados, David, José Francisco Maestre-Valero, Javier Calatrava, and Victoriano Martínez-Álvarez. 2011. "The Economic Impact of Water Evaporation Losses from Water Reservoirs in the Segura Basin, SE Spain." *Water Resources Management* 25 (13): 3153–3175.

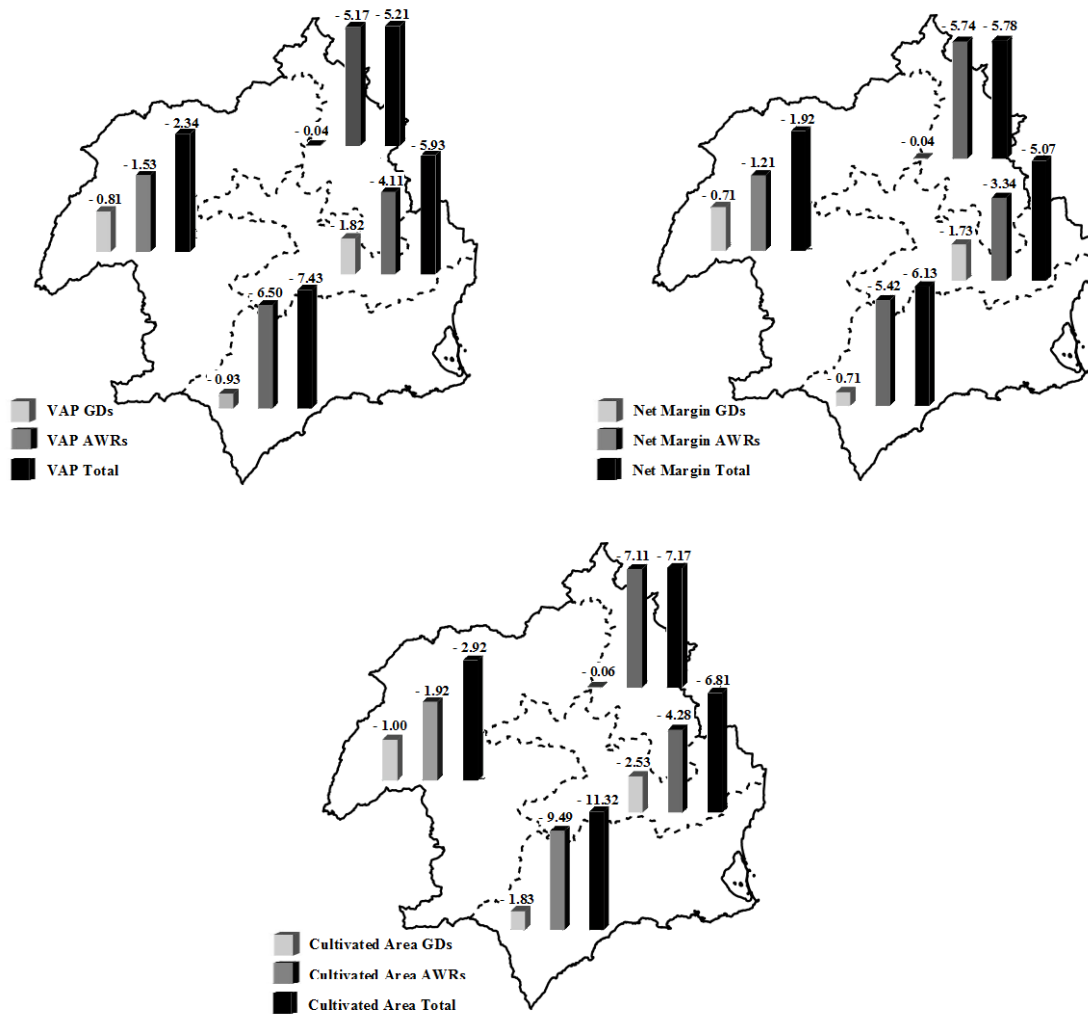


Fig. 4 Economic impact of evaporation losses by areas in relative terms (% reduction in Total VAP, net margin and cultivated area)

Martínez-Granados, David, José Francisco Maestre-Valero, Javier Calatrava, and Victoriano Martínez-Álvarez. 2011. "The Economic Impact of Water Evaporation Losses from Water Reservoirs in the Segura Basin, SE Spain." *Water Resources Management* 25 (13): 3153–3175.

Tables

Table 1. Main geometric characteristics and period of study for the selected GDs.

	GD name	Maximum Surface Area (m² x 10⁴)	Maximum Volume (m³ x 10⁶)
1	La Cierva *	53	7
2	Anchuricas **	57	6
3	Crevillente **	91	13
4	Argos **	136	8
5	Valdeinfierno **	199	11
6	Alfonso XIII **	216	23
7	Algeciras ***	235	42
8	Santomera **	263	27
9	Tálave *	295	39
10	Camarillas **	359	39
11	Puentes ***	366	29
12	Fuensanta **	924	225
13	La Pedrera *	1272	247
14	Cenajo *	1732	465

Source: www.chsegura.es. Periods of study: *2000-2006; **2000-2008; ***2002-2008.

Table 2. Irrigated surface and agricultural water demand for the Segura basin per areas

Areas	Irrigable area (ha)	Irrigated area (ha)	Gross water demand (10⁶ m³/year)	Net water demand (10⁶ m³/year)
Coastal Areas and Guadalentín Valley	134,981	90,756	459.9	410.1
Eastern Highlands and Creeks	58,765	31,524	107.5	95.7
Segura River Valley	147,146	110,049	668.3	568.5
Upper Basin and Western Highlands	48,365	36,693	196.7	151.2
Total	389,257	269,022	1,432.4	1,225.5

Source: Elaboration based on official data from the National Hydrological Plan (MMA, 2001). Note: Gross or raw water is measured in the reservoirs and aquifers prior to being transported to the irrigated areas; Net water is measured at the head of the farm's distribution networks and is the amount of water effectively received by the farmers.

Martínez-Granados, David, José Francisco Maestre-Valero, Javier Calatrava, and Victoriano Martínez-Álvarez. 2011. "The Economic Impact of Water Evaporation Losses from Water Reservoirs in the Segura Basin, SE Spain." *Water Resources Management* 25 (13): 3153–3175.

Table 3. Gross agricultural water demand by water sources in the Segura basin ($10^6 \text{ m}^3 \text{ year}^{-1}$)

Areas	Surface	Tajo-Segura Aqueduct	Treated waste-water	Desalinized	Ground - water	Gross water demand
Coastal Areas and Guadalentín Valley	19.2	201.9	29.9	7	201.9	459.9
Eastern Highlands and Creeks	1.7	0.6	0.6	-	104.6	107.5
Segura River Valley	381.9	197.3	20.4	21.6	47.1	668.3
Upper Basin and Western Highlands	135.8	-	2.7	-	58.2	196.7
Total	538.6	399.8	53.6	28.6	411.8	1,432.4

Source: Elaboration based on official data from the National Hydrological Plan (MMA, 2001).

Table 4. Water scarcity scenarios for each source of water for irrigation (percentage of water availability with respect to the scenario in the National Hydrologic Plan, PHN)

	Surface	Tajo-Segura Aqueduct	Treated waste-water	Desalinized	Ground -water	Total resources
PHN water availability scenario	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
Current situation	80 %	50 %	100 %	100 %	80 %	72.5 %

Table 5. Monthly Kp coefficients proposed by Témez (2007) for GDs in Spain.

Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Kp	1.20	1.04	0.85	0.70	0.60	0.55	0.55	0.60	0.70	0.98	1.30	1.34

Martínez-Granados, David, José Francisco Maestre-Valero, Javier Calatrava, and Victoriano Martínez-Álvarez. 2011. "The Economic Impact of Water Evaporation Losses from Water Reservoirs in the Segura Basin, SE Spain." *Water Resources Management* 25 (13): 3153–3175.

Table 6. Current water availability for irrigation and evaporation losses with respect to the baseline evaporation scenario for AWRs and GDs in the different areas of the basin.

Area of the basin	Water use (x 10 ⁶ m ³ year ⁻¹)			Change from baseline scenario (A)		
	A. Baseline (no evap. losses)	B. Minus losses in GDs	C. Minus losses in AWRs	Losses in GDs [(A-B)/A]	Losses in AWRs [(B-C) /A]	Total losses [(A-C)/A]
Coastal Areas and Guadalentín Valley	285.74	280.66	252.09	1.78 %	10.00 %	11.78 %
Eastern Highlands and Creeks	76.54	76.48	70.85	0.08 %	7.36 %	7.43 %
Segura River Valley	424.02	411.58	390.23	2.93 %	5.04 %	7.97 %
Upper Basin and Western Highlands	123.80	121.35	118.61	1.98 %	2.21 %	4.19 %
Whole Basin (net water)	910.09	890.07	831.78	2.20 %	6.40 %	8.60 %
Whole basin (gross water)	1,066.09	1,042.42	975.48	2.22%	6.28 %	8.50 %

Table 7. Economic impact of water losses by evaporation in the Segura basin

Area of the basin	Water losses considered (Evaporation scenario)	Value of agricultural production (million euros)	Net farm margin (million euros)	Cultivated area (ha)
Coastal Areas and Guadalentín Valley	A. Baseline (no evap. losses)	1,056	456	52,470
	B. Minus losses in GDs	1,047	453	51,510
	C. Minus losses in AWRs	978	428	46,533
Eastern Highlands and Creeks	A. Baseline (no evap. losses)	189	81	16,881
	B. Minus losses in GDs	189	81	16,870
	C. Minus losses in AWRs	179	76	15,670
Segura River Valley	A. Baseline (no evap. losses)	688	300	81,910
	B. Minus losses in GDs	675	295	79,839
	C. Minus losses in AWRs	647	285	76,330
Upper Basin and Western Highlands	A. Baseline (no evap. losses)	203	77	30,429
	B. Minus losses in GDs	201	77	30,125
	C. Minus losses in AWRs	198	76	29,540
Whole basin (absolute terms)	A. Baseline (no evaporation)	2,136	914	181,690
	B. Minus losses in GDs	2,112	905	178,343
	C. Minus losses in AWRs	2,002	865	168,073
Whole basin (% change from the baseline scenario)	Losses in GDs [(A-B)/A]	1.1 %	1.0 %	1.8 %
	Losses in AWRs [(B-C) /A]	5.2 %	4.4 %	5.7 %
	Total losses [(A-C)/A]	6.3 %	5.4 %	7.5 %

Capítulo IV. Publicación 2

IV.1. Resumen de la publicación

Título

Impacto Socio-Económico de las pérdidas por evaporación de los embalses bajo los escenarios de disponibilidad de agua, pasado, presente y futuro en la cuenca semiárida del Segura

Referencia de la publicación

Maestre-Valero, J. F., Martínez-Granados, D., Martínez-Álvarez, V. and Calatrava, J. (2013). "Socio-Economic Impact of Evaporation Losses from Reservoirs Under Past, Current and Future Water Availability Scenarios in the Semi-Arid Segura Basin." *Water Resources Management* 27(5): 1411–1426.

Introducción

El desarrollo económico, el crecimiento demográfico y, muy especialmente, la expansión de la agricultura de regadío han causado un gran aumento de la demanda de agua en los países mediterráneos. Como resultado se han incrementado notablemente las extracciones del sistema hidrológico, llegando incluso a superar la disponibilidad de recursos hídricos en algunas regiones (Iglesias *et al.*, 2007). Además, las predicciones de cambio climático para los países Mediterráneos sugieren que es probable que esta situación empeore en un futuro próximo (IPCC, 2007), mostrando un aumento del estrés hídrico en el sur de Europa. El Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático espera que los cambios previstos en la temperatura y las precipitaciones en las cuencas Mediterráneas den lugar a una disminución notable en los recursos hídricos disponibles, que incluso puede llegar hasta el 40% (IPCC, 2008). Por lo tanto, el desarrollo y la aplicación del conocimiento científico sobre la gestión sostenible de recursos hídricos son de suma importancia para los países mediterráneos (Christodoulou, 2011)

La escasez de agua en el largo plazo es especialmente grave en la cuenca del Segura, a pesar de recibir recursos externos del Tajo a través del Acueducto Tajo-Segura (ATS). La enorme expansión de la superficie regada durante las últimas tres

décadas ha causado un déficit estructural de agua crónico, que posiciona al Segura como una de las cuencas más estresadas en el Mediterráneo (MED WS&D WG, 2007). Además, las previsiones sugieren que la disponibilidad de agua disminuirá hasta en un 16% en el escenario de 2030 (MIMAM, 2000) y hasta en un 28% en el escenario de 2060 (Moreno *et al.*, 2005), ambas cifras en comparación con la situación actual de los recursos hídricos en la cuenca.

Martínez-Granados *et al.* (2011) estimaron la pérdida por evaporación anual de de las masas de agua de la cuenca del Segura en aproximadamente 78 hm³ (el 8,6% del consumo estimado de agua para el riego y el 6,8% del consumo estimado total de agua). Además, la evaporación de agua en embalses se prevé que aumente dada la mayor capacidad de la atmosfera para retener agua a temperaturas más altas, mientras que la humedad relativa no se prevé que cambie notablemente. Como resultado, el déficit de vapor de agua en la atmósfera aumentará, al igual que la tasa de evaporación (Trenberth *et al.* 2003). En la cuenca del Segura se espera que la temperatura media del aire aumente en 1 °C y 2,5 °C para los escenarios de 2030 y de 2060, respectivamente (MIMAM, 2000; Moreno *et al.*, 2005).

En vista de la importancia relativa de las pérdidas por evaporación en embalses de agua y la severidad de las predicciones del cambio climático, es crucial evaluar su magnitud y el impacto económico en regiones con estrés hídrico, como la cuenca del Segura, con el fin de optimizar la planificación y gestión de los recursos hídricos ante tan desfavorable perspectiva.

Hay muy pocos estudios sobre los efectos del cambio climático en la evaporación de las masas de agua (Schindler y Donahue, 2006; Jurak, 1989), así como pocos estudios que evalúen el impacto de las pérdidas por evaporación desde una perspectiva económica (Ward 1987; Craig *et al.*, 2005; Martínez-Granados *et al.*, 2011). En concreto, Martínez-Granados *et al.* (2011) evaluaron el impacto económico de las pérdidas por evaporación de las masas de agua en la cuenca del Segura. Sin embargo, no se han publicado hasta la fecha estudios sobre la evaluación económica de las pérdidas por evaporación ante los futuros escenarios de disponibilidad de agua.

En esta publicación se evalúa el impacto hidrológico y económico de las pérdidas de agua por evaporación en grandes embalses y pequeñas balsas de riego de la cuenca del Segura considerando diferentes escenarios de disponibilidad de agua, definidos en función de las predicciones de cambio climático y distintas consideraciones sobre el futuro de la política hídrica en el trasvase Tajo-Segura. La metodología propuesta aporta

varias contribuciones originales. En primer lugar, se cuantifica el impacto del cambio climático sobre la evaporación de las masas de agua de la cuenca del Segura, así como la creciente importancia de las pérdidas por evaporación de las masas de agua para cinco escenarios diferentes de disponibilidad de agua. En segundo lugar, se evalúa el impacto social y económico de dichas pérdidas de agua, así como el impacto económico de los escenarios de cambio climático en el regadío de la cuenca. La evaluación del impacto económico de los escenarios de cambio climático gana en precisión al tener en cuenta las pérdidas por evaporación en el análisis.

Metodología

El enfoque metodológico propuesto es similar al de Martínez-Granados *et al.* (2011), aunque este trabajo se centra en el análisis comparativo de cinco escenarios futuros de disponibilidad de agua, definidos en función de las predicciones del cambio climático y de la disponibilidad de los recursos proporcionados por el trasvase Tajo-Segura, y teniendo en cuenta el impacto creciente del cambio climático sobre la evaporación de agua en embalses y balsas de riego.

Se ha utilizado un enfoque multidisciplinar para estudiar los impactos hidrológicos y económicos de las pérdidas por evaporación en la cuenca del Segura bajo los escenarios considerados. Este enfoque combina: (i) la aplicación de modelos de balance de energía para evaluar el efecto del cambio climático en la evaporación de las masas de agua, (ii) el uso de datos de tanque evaporímetro Clase-A y coeficientes de tanque calibrados regionalmente para determinar la pérdida por evaporación a escala regional y (iii) el uso de un modelo de programación matemática no lineal para evaluar el impacto económico de tales pérdidas en la agricultura de regadío.

Escenarios de disponibilidad de agua

Los cinco escenarios de disponibilidad de agua (SC) considerados en el análisis son los siguientes:

1. Escenario 1 (SC1): es el escenario base teórico y se ha definido en base a los datos oficiales de disponibilidad de recursos hídricos en la cuenca del Segura, que consideran los flujos renovables anuales medios de los recursos hídricos para el período 1940-1996, y que asumen que el ATS siempre transfiere a la cuenca del Segura la máxima dotación de agua establecida legalmente para riego (399,8 hm³/año).

2. Escenario 2 (SC2), denominado "situación actual": asume que el ATS sólo suministra la mitad de la máxima dotación anual de agua transferible para el riego, y que

la superficie de la cuenca y los recursos de agua subterránea son un 20% menores que en el escenario base. Estas reducciones son equivalentes a los registros medios anuales de recursos hídricos renovables para el período 1980-2005 (un descenso del 20% con respecto al período 1940-1996) y la cantidad media de agua transferida para el riego a través del ATS desde su entrada en funcionamiento. Este escenario actual es equivalente a una reducción del 27,5% en la disponibilidad de agua en la cuenca con respecto al escenario base.

3. Escenario 3 (SC3): es equivalente a SC2, salvo que el ATS no está operativo. Debido a la creciente escasez de agua en la cuenca del Tajo, existe la posibilidad de que en el futuro pudieran cancelarse los trasvases de agua desde el Tajo. Este escenario es equivalente a una reducción del 41,2% en la disponibilidad de agua con respecto al escenario base.

4. Escenario 4 (SC4): se considera el efecto previsto del cambio climático sobre los recursos hídricos disponibles y la tasa de evaporación de agua de las masas de agua superficiales para el año 2030, además de la cancelación de la transferencia de agua del ATS. Según MIMAM (2000), la disminución media de los recursos hídricos para la cuenca del Segura estimada para 2030 es del 16% en comparación con el escenario actual, lo que equivale a una reducción del 32,8% en los recursos superficiales y subterráneos de la cuenca en comparación con el escenario base. Este escenario supone una disminución total del 49,7% en los recursos de la cuenca del Segura para la agricultura con respecto al escenario base. Se espera que la tasa de evaporación aumente en un 3,1% en este escenario.

5. Escenario 5 (SC5): es similar al escenario SC4 anterior, excepto que en éste se considera el efecto del cambio climático para el horizonte 2060. La disminución proyectada de los recursos hídricos en la cuenca del Segura para este horizonte de tiempo es un 28% menor que en la situación actual (Moreno *et al.*, 2005), equivalente a una reducción del 42,4% en los recursos propios de la cuenca con respecto al escenario base. Añadiendo el efecto de cancelación del ATS, la disminución en el total de recursos de la cuenca del Segura con respecto al escenario base es del 56,0%. Además, la tasa de evaporación se espera que aumente en un 7,7% en este escenario.

Con el fin de simplificar el análisis, en los diferentes escenarios futuros no se han considerado variaciones en la disponibilidad de los recursos procedentes de la desalinización de agua de mar o en la demanda de agua para riego, aunque ambos podrían aumentar a medio y largo plazo.

Cálculo de las pérdidas por evaporación bajo los diferentes escenarios de cambio climático

Las pérdidas por evaporación se calcularon para el período 2000-2006 utilizando la base de datos y la metodología propuesta por Martínez-Álvarez *et al.* (2008) en el caso de las balsas de riego, y la metodología propuesta por Martínez-Granados *et al.* (2011) para el caso de grandes embalses.

El impacto del cambio climático sobre la evaporación en las balsas de riego de la cuenca del Segura se ha realizado mediante un modelo basado en la formulación matemática del balance de energía de la masa de agua (Martínez-Álvarez *et al.*, 2007), con el que se ha determinado el efecto del aumento de la temperatura del aire (T_a) y de la temperatura de la superficie del agua (T_s) en la tasa de evaporación (E) para los escenarios 2030 y 2060. El efecto del cambio climático en la E se determinó mediante la comparación de los resultados de la modelización con y sin cambio de las temperaturas. El modelo utiliza información meteorológica diaria y datos de la geometría de las masas de agua. Martínez-Álvarez *et al.* (2008) demostraron que este enfoque metodológico se podría aplicar para obtener con precisión la E para cuerpos de agua poco profundos en los lugares donde se dispone de datos agro-meteorológicos estándar. El área de evaporación total en las balsas de riego fue la misma, ya que dichas balsas continuarán sirviendo como reserva de emergencia bajo condiciones de estrés hídrico. Hubo sólo una excepción: se ha considerado que las balsas de riego situadas en áreas suministradas exclusivamente con recursos del ATS estarán vacías en los escenarios que contemplan la cancelación del ATS.

En cuanto a los grandes embalses, se aplicaron los mismos coeficientes mensuales de tanque propuestos por Martínez-Granados *et al.* (2011), considerando el efecto del cambio climático tanto en la tasa de evaporación (E) del tanque evaporímetro Clase-A como el área de la superficie de agua en los grandes embalses. Este área se redujo para cada escenario teniendo en cuenta la disminución de los recursos totales de agua con respecto al escenario base y siguiendo la curva batimétrica para cada embalse.

En base a esta metodología, se estimó que los aumentos previstos de la temperatura del aire para los escenarios de 2030 y 2060 eleven la tasa de evaporación del agua media en los embalses de la cuenca del Segura en un 3,1% y el 7,7%, respectivamente.

Obtención del Valor Económico de Uso del Agua

El impacto económico de las pérdidas por evaporación en cada uno de los escenarios de disponibilidad de agua se ha evaluado utilizando un modelo de programación matemática no lineal que simula el uso económico del agua en la agricultura de regadío de la cuenca del Segura, y que se describe en el resumen del primer artículo que conforma esta tesis. En este trabajo, se ha ampliado dicho modelo para incluir los requisitos de mano de obra de cada cultivo con el fin obtener resultados adicionales en términos de empleo agrario y se han actualizado los parámetros económicos del mismo.

En este estudio, se ha utilizado el modelo matemático para simular el impacto económico de la reducción en el volumen de agua disponible, causado por las pérdidas por evaporación de agua en cada unidad de demanda agraria (UDA) de la cuenca y para cada uno de los cinco escenarios de disponibilidad de agua propuestos.

Resultados

Los resultados obtenidos indican que las pérdidas por evaporación en las balsas de riego se reducen aproximadamente en un 20% entre los escenarios SC1 y SC2 y los escenarios SC3, SC4 y SC5 (Tabla IV.1), estas reducciones se atribuyen principalmente a la supresión del ATS en los últimos tres escenarios y la consecuente eliminación de las pérdidas de agua en las balsas localizadas en zonas de regadío donde se suministran recursos provenientes de esta fuente. En general, la tendencia en el porcentaje de las pérdidas por evaporación en las balsas de riego con respecto a la disponibilidad total de agua en cada escenario, es aumentar y se mueve en un rango que va desde 4,6% a 8,3%.

Tabla IV.1. Disponibilidad de agua y pérdidas por evaporación para los escenarios de disponibilidad de agua propuestos (SC1 a SC5) y situaciones de evaporación (A, B y C) en la cuenca del Segura.

Escenarios de disponibilidad de agua	Disponibilidad de agua (hm ³)			Pérdidas por evaporación (hm ³)		
	A; Sin pérdidas por evaporación	B; Menos pérdidas en grandes embalses	C; Menos pérdidas en balsas de riego	Pérdidas totales (A-C)	Pérdidas en grandes embalses (A-B)	Pérdidas en balsas de riego (B-C)
SC1	1.460,16	1.432,40	1.365,46	94,70	27,76	66,94
SC2	1.066,09	1.042,42	975,48	90,61	23,67	66,94
SC3	866,19	842,52	790,48	75,71	23,67	52,04
SC4	743,65	720,87	668,68	74,97	22,78	52,19
SC5	651,54	629,63	575,25	76,29	21,91	54,38

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, la superficie de evaporación en los grandes embalses también disminuye en los escenarios futuros como consecuencia de la reducción de los recursos hídricos, y por tanto disminuye la evaporación de agua anual en los grandes embalses, pasando de 27,76 hm³/año en SC1 a 21,91 hm³/año en SC5 (Tabla IV.1). En promedio para todos los escenarios, la evaporación de agua en los grandes embalses es el 41% de la evaporación en las balsas de riego.

En resumen, la disponibilidad de agua en la cuenca podría reducirse hasta en un 40% en el escenario más desfavorable (SC5) con respecto al escenario “situación actual” (SC2). Las reducciones en la disponibilidad de agua en los escenarios considerados conducen a una disminución en la cantidad total de las pérdidas por evaporación, pero también a un aumento significativo de la importancia relativa de dichas pérdidas, aumentando del 6,5% al 11,7% de los recursos hídricos disponibles para el riego en la cuenca conforme se pasa del SC2 al SC5. Para todos los escenarios, la evaporación en pequeñas balsas de riego es más del doble que las pérdidas en grandes embalses, y su peso relativo aumenta a medida que disminuyen los recursos hídricos en los escenarios futuros de disponibilidad de agua.

Desde una perspectiva económica, en general para todos los escenarios, la pérdida de agua por evaporación conduce a una reducción en el valor de la producción agraria en la cuenca, el margen neto de las explotaciones, la superficie cultivada y el empleo agrario. La magnitud de tales reducciones aumenta del escenario SC1 al SC5 ya que depende de la disponibilidad de agua, como se muestra en la Tabla IV.2.

Tabla IV.2. Impactos económicos de las pérdidas por evaporación de agua en balsas de riego, grandes embalses y totales para los escenarios propuestos de disponibilidad de agua en la cuenca del Segura.

Escenarios de disponibilidad de agua	Situaciones de evaporación	Valor de la producción (M€/año)	Margen neto (M€/año)	Área cultivada (ha)	Empleo agrario (empleos/año)
SC1	A. Referencia (Sin evaporación)	2.589	1.080	233.865	80.292
	B. Menos pérdidas en grandes embalses	2.570	1.074	230.208	79.458
	C. Menos pérdidas en balsas de riego	2.477	1.037	220.193	75.958
SC2	A. Referencia (Sin evaporación)	2.136	914	175.318	63.250
	B. Menos pérdidas en grandes embalses	2.112	905	172.061	62.333
	C. Menos pérdidas en balsas de riego	2.002	865	161.906	58.542
SC3	A. Referencia (Sin evaporación)	1.768	776	143.307	51.792
	B. Menos pérdidas en grandes embalses	1.722	754	139.908	50.375
	C. Menos pérdidas en balsas de riego	1.610	707	131.383	46.625
SC4	A. Referencia (Sin evaporación)	1.613	716	124.216	46.167
	B. Menos pérdidas en grandes embalses	1.567	695	120.755	44.792
	C. Menos pérdidas en balsas de riego	1.441	642	112.799	40.833
SC5	A. Referencia (Sin evaporación)	1.479	663	109.924	41.625
	B. Menos pérdidas en grandes embalses	1.432	642	106.647	40.167
	C. Menos pérdidas en balsas de riego	1.296	583	98.116	36.000

Fuente: Elaboración propia

La progresiva reducción en la disponibilidad de agua en los escenarios considerados tiene importantes impactos económicos sobre el regadío de la cuenca (Tabla IV.2). Si comparamos la situación de evaporación C en cada uno de los cinco escenarios, se puede observar que la disminución de la disponibilidad de agua da como

resultado una reducción progresiva de todos los indicadores económicos considerados. Por ejemplo, si se compara el peor escenario previsto (SC5) con la situación actual (SC2), el valor de la producción agraria se reduciría en 706 M€/año (35,3%), el margen neto de los agricultores en 282 M€/año (32,6%), la superficie de regadío en 63.790 ha (39,4%) y el empleo agrario en 22.542 empleos anuales (38,5%).

La reducción en el valor de la producción agraria en la cuenca debida a las pérdidas por evaporación aumenta del 3,6% en SC1 al 9,2% en SC5 debido a las pérdidas en las balsas de riego, y del 0,7% en SC1 al 3,1% en SC5 en los grandes embalses, valores que se justifican por la mayor magnitud de las pérdidas en las balsas de riego respecto a los grandes embalses en todos los escenarios. En promedio, para todos los escenarios de disponibilidad de agua, la reducción global del valor de la producción agraria es de 152 M€/año, de los cuales 115 M€/año se deben a las pérdidas en las balsas de riego. Los resultados en términos de margen neto son similares a los resultados del valor de la producción agraria para todos los escenarios. Esto es porque la relación entre estos dos indicadores económicos es bastante estable en la cuenca del Segura, en torno al 40%.

Como resultado de la disminución en la disponibilidad de agua en los escenarios propuestos, la superficie cultivada muestra un descenso casi lineal de hasta 123.941 ha (53% de reducción) entre SC1 y SC5 (Tabla IV.2). El efecto de las pérdidas por evaporación en la superficie cultivada también aumenta linealmente con la escasez de agua. En promedio para todos los escenarios, las pérdidas de agua dan como resultado 12.446 ha que no serían cultivadas en la cuenca, donde 9.036 ha (aproximadamente 72,5%) se atribuyen a las pérdidas por evaporación ocasionadas en las balsas de riego.

Debido a la disminución en la disponibilidad de agua en la cuenca el empleo agrario se reduciría en 38.667 empleos anuales (reducción del 48,1%). La reducción debida a las pérdidas por evaporación se incrementa del 5,4% a 13,5% al pasar del escenario SC1 al SC5. En promedio, las pérdidas globales de agua por evaporación para todos los escenarios dan como resultado una reducción anual de 5.033 empleos, donde en promedio 3.833 empleos (entre el 75% y el 80%) corresponden a las pérdidas de agua ocasionadas en las balsas de riego (Tabla IV.2).

En resumen, teniendo en cuenta el horizonte del año 2060 (SC5), el peor de los casos, las pérdidas por evaporación en grandes embalses y balsas de riego de la cuenca, producirían una reducción del 12,4% en el valor de la producción agraria, el

12,1% del margen neto de los agricultores, el 10,7% de la superficie cultivada y el 13,5% del empleo agrario de la cuenca.

El agua que se pierde por evaporación en las balsas de riego es más valiosa que el agua que se pierde en los grandes embalses, tanto en términos absolutos como relativos para todos los escenarios propuestos. Por ejemplo el agua que se evapora en los grandes embalses en las predicciones futuras de cambio climático (SC4 y SC5) provocaría una pérdida media en el valor de la producción agraria de 2,019 €/m³ y 2,145 €/m³, respectivamente, mientras que el agua evaporada en las balsas de riego causaría una pérdida de 2,414 €/m³ y 2,501 €/m³, respectivamente. Esto ocurre porque las balsas se localizan en las zonas agrarias más rentables y las pérdidas de agua por evaporación en grandes embalses ocurren antes de que el agua sea transportada a las zonas de regadío y se distribuya a las explotaciones.

Conclusiones

El presente estudio proporciona un análisis útil que ilustra el importante papel actualmente desempeñado por las pérdidas por evaporación en las balsas y embalses de la cuenca del Segura desde una perspectiva hidrológica y económica, así como su clara y marcada tendencia al alza para los escenarios futuros teniendo en cuenta la magnitud del impacto de las predicciones de cambio climático en la disponibilidad futura de recursos hídricos y sus usos en el sur de Europa, así como los problemas socio-políticos.

Estos importantes impactos hidrológicos y económicos ponen de relieve la necesidad de tener en cuenta las pérdidas por evaporación para la gestión y planificación de los recursos hídricos en la cuenca del Segura, tanto en la situación actual como en las futuras. Además, puesto que las pérdidas por evaporación en pequeñas balsas de riego no son consideradas por los gestores del agua en la planificación hidrológica de la cuenca, ni son incorporadas en sus balances hídricos, las metodologías para la evaluación de alternativas de gestión para mejorar la eficiencia técnica y económica del uso del agua en los diferentes niveles (cuenca, colectivos de riego y explotaciones) serían más eficientes al considerar dichas pérdidas.

En este sentido, una gestión precisa del agua y la planificación de escenarios a largo plazo debe basarse en un marco multicriterio flexible, transparente e integral (Getirana *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2008; Opricovic 2009; Tsakiris y Spiliotis 2011) y por lo tanto debe incluir el impacto de las pérdidas por evaporación en las masas hídricas, especialmente en zonas áridas y semiáridas y con estrés hídrico.

Los resultados de este estudio evidencian la necesidad de utilizar técnicas alternativas destinadas a reducir la evaporación en los embalses en regiones con estrés hídrico como la cuenca del Segura. Además, con la probable reducción futura de la disponibilidad de agua se espera que aumente la competencia por los recursos hídricos, incrementándose el valor económico del agua evaporada. Esta circunstancia debería afectar a la rentabilidad de este tipo de medidas para reducir la evaporación.

Sin embargo, las estrategias más comunes para la adaptación a escenarios de creciente escasez de agua siguen basándose todavía en medidas de oferta como la construcción de embalses (Santos *et al.*, 2002; Moreno *et al.*, 2005; IPCC, 2008). Esta estrategia representa un aumento de la superficie del agua, lo que, junto con los futuros aumentos en la tasa de evaporación, podría dar lugar a pérdidas de agua adicionales. Estas pérdidas podrían contrarrestar otros efectos positivos del aumento de almacenamiento de agua en el balance hídrico de la cuenca, lo que resulta en una menor disponibilidad de agua para las cuencas muy estresadas.

IV.2. Copia de la publicación

Maestre-Valero, J. F., D. Martínez-Granados, V. Martínez-Álvarez, and J. Calatrava. 2013. "Socio-Economic Impact of Evaporation Losses from Reservoirs Under Past, Current and Future Water Availability Scenarios in the Semi-Arid Segura Basin." *Water Resources Management* 27 (5): 1411–1426.

Socio-economic impact of evaporation losses from reservoirs under past, current and future water availability scenarios in the semi-arid Segura basin

Maestre-Valero, J.F.*, Martínez-Granados, D., Martínez-Álvarez, V., Calatrava, J.
Universidad Politécnica de Cartagena. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica.

Paseo Alfonso XIII, 48. 30203 Cartagena. Spain.

() Corresponding author. Tel.: +34-968327052; Fax: +34-968325433; E-mail: josef.maestre@upct.es*

Abstract

This study assesses evaporation losses from water reservoirs in the semi-arid Segura basin (south-east Spain), one of the most water stressed European catchments. These losses are evaluated from both the hydrologic and economic perspectives under different water availability scenarios that are based on water policy trends and climate change predictions. We take a multidisciplinary approach to the analysis, combining energy balance models to assess the effect of climate change on evaporation from water bodies, Class-A pan data and pan coefficients to determine evaporation loss on a regional scale, and non-linear mathematical programming modelling to simulate the economic impact of water use and allocation in the basin. Our results indicate that water availability could be reduced by up to 40% in the worst-case scenario, with an economic impact in the 32-36% range, depending on the indicator in question. The total annual evaporation loss from reservoirs ranges from 6.5% to 11.7% of the water resources available for irrigation in the basin, where evaporation from small reservoirs is more than twice that from large dams. The economic impact of such losses increases with water scarcity, ranging from 4.3% to 12.3% of the value of agricultural production, 4.0% to 12.0% of net margin, 5.8% to 10.7% of the irrigated area, and 5.4% to 13.5% of agricultural employment. Results illustrate the importance of evaporation losses from reservoirs in this region and the marked upward trend for future scenarios. Besides, they highlight the extent of the impact of climate change on future water resources availability and use in southern Europe.

Keywords: Water management; Climate Change; Water Economics; Value of Water; Dams.

Maestre-Valero, J. F., D. Martínez-Granados, V. Martínez-Álvarez, and J. Calatrava. 2013. "Socio-Economic Impact of Evaporation Losses from Reservoirs Under Past, Current and Future Water Availability Scenarios in the Semi-Arid Segura Basin." *Water Resources Management* 27 (5): 1411–1426.

1. Introduction

Population growth, economic, social and urban development and, especially, irrigation have led to large increases in water demands in Mediterranean countries. This has resulted in extensive water withdrawals that have come to exceed renewable water resources in some regions, putting increasing pressure on water resources (Iglesias et al., 2007). Climate change (CC) forecasts for Mediterranean countries suggest that the situation is likely to worsen in the near future (IPCC, 2007). The area affected by water shortages might increase within a short time span, leading to increasing competition for available water resources (Alcamo et al., 2003; Schröter et al., 2005) and to potential conflicts between users and regional administrations (MED WS&D WG, 2007; Iglesias et al., 2009). Therefore, the development and application of scientific knowledge on sustainable water resources management is of paramount importance in Mediterranean countries (Christodoulou, 2011).

Long-term water scarcity, a concept normally used to show the inability of an area's exploitable water resources to cover current and future water demands (Tsakiris and Spiliotis, 2011), is especially severe in the Segura, a semi-arid basin located in south-east Spain. Although the basin usually receives external resources from central Spain through the Tajo-Segura Aqueduct (TSA), the huge expansion of the irrigated area over the last 3 decades has caused a chronic structural water deficit that positions the Segura as one of the most water stressed basins in the Mediterranean (MED WS&D WG, 2007). In fact, the Spanish Government selected the Segura as the Spanish Pilot River Basin within the European Water Scarcity and Drought Expert Network. It currently suffers from water management problems, which, as a result of CC and increasing water withdrawals, will be surely common in most Mediterranean regions in the coming decades.

In arid and semi-arid regions, evaporation losses from water reservoirs can be potentially large (Gupta et al., 2002; Craig et al., 2005; Gökbülak and Özhan, 2006). Martínez-Granados et al. (2011) estimated the annual evaporation loss from water reservoirs for the Segura basin at around 78 hm³ (8.6% of the current estimated water consumption for irrigation and 6.8% of the current estimated total water consumption). Such a loss affects the overall water use efficiency in agriculture and counterbalances

Maestre-Valero, J. F., D. Martínez-Granados, V. Martínez-Álvarez, and J. Calatrava. 2013. "Socio-Economic Impact of Evaporation Losses from Reservoirs Under Past, Current and Future Water Availability Scenarios in the Semi-Arid Segura Basin." *Water Resources Management* 27 (5): 1411–1426.

most of the efficiency gains derived from generalized improvements in irrigation water distribution and application systems.

Moreover, CC predictions project an increasing water stress for southern Europe. The Intergovernmental Panel on Climate Change expects that predicted changes in temperature and precipitation in the Mediterranean basin will lead to substantial decreases in available water resources, even by 40% (IPCC, 2008). Additionally, evaporation from open-water surfaces is projected to increase since the atmosphere's water-holding capacity increases at higher temperatures, whereas relative humidity is not projected to change markedly. As a result, water vapour deficit in the atmosphere will increase, as will the evaporation rate (Trenberth et al., 2003).

In view of the relative importance of evaporation losses from water storages and the severity of CC predictions, it is crucial to assess their magnitude and economic impact in water stressed regions, such as the semi-arid Segura basin, to optimize water surveying, planning and management.

There are very few studies dealing with the effect of CC on evaporation from water bodies. Schindler and Donahue (2006) reported in research on the Experimental Lakes Area northwest of Kenora (Canada) that, with a rise of 2 °C in average air temperature, the lake water temperature would increase by about 1.5 °C, suggesting a substantial increase in evaporation losses. Jurak (1989) suggested that evaporation from shallow water bodies would increase by 11-24% on the 49th parallel of latitude in Europe for a warming of 2.8 °C. In agreement with this, we believe the key issue for the analysis of the effect of CC on evaporation from water bodies is an accurate computation of water temperature increases. In that sense, straightforward mechanistic models such as the one proposed by Martínez-Alvarez et al. (2007), might forecast (under future scenarios considering CC predictions) daily surface water temperature and evaporation by numerically solving the energy balance at the water body surface.

In addition, there are only a few studies assessing the impact of evaporation losses from an economic perspective (Ward, 1987; Craig et al., 2005; Martínez-Granados et al., 2011). Specifically, Martínez-Granados et al. (2011) assessed the economic impact of evaporation losses from water reservoirs in the Segura basin. However, no economic assessment of evaporation losses under future water availability

Maestre-Valero, J. F., D. Martínez-Granados, V. Martínez-Álvarez, and J. Calatrava. 2013. "Socio-Economic Impact of Evaporation Losses from Reservoirs Under Past, Current and Future Water Availability Scenarios in the Semi-Arid Segura Basin." *Water Resources Management* 27 (5): 1411–1426.

scenarios has been published to date. As the agricultural sector is usually the sector most affected by water shortages, any assessment of water evaporation losses should consider the economic impact on irrigation.

Among the existing alternative methodologies for the economic valuation of irrigation water, mathematical programming is the most powerful tool for valuing water resources in agricultural systems with more than one crop, as it requires fewer data than other more costly methods (Young, 2005). Furthermore, agro-economic optimization models are the most used approach for the economic valuation of water use in agriculture (Amini Fasakhodi et al, 2010; Carmona et al., 2011; Regulwar and Gurav, 2011; Martínez-Granados et al., 2011). One of the major advantages of this type of models is that they are able to estimate the economic impact of changes on the technical-economic parameters used in the model (water availability, crop yields, prices, costs, etc.) in order to evaluate future management alternatives at different spatial levels or future scenarios of increased scarcity, such as CC predictions or socio-political debates.

This study has multiple original contributions. First, we quantify the impact of future CC predictions on evaporation from water bodies in the Segura basin. Second, we assess the increasing relevance of evaporation losses from water reservoirs under five different water availability scenarios. Third, we evaluate the social and economic impact of such water losses. Finally, we assess the economic impact of the future CC scenarios on the basin's irrigated agriculture; this is a more accurate assessment as it accounts for the increased evaporation losses.

2. The Segura basin and water reservoirs

The Segura basin is one of the most water stressed regions in the Mediterranean basin. It is a predominantly agricultural region, where 9,830 km² (52.1% of the basin area) is agricultural land, 6,800 km² is currently cultivated, and a maximum of 2,420 km² is irrigated land (CHS, 2007). The irrigated horticultural sector plays a major role in the basin's economy in terms of production, employment and exports.

According to the Segura River Basin Authority (CHS, 2007), the basin faces a structural water deficit that amounts to 370 hm³ yr⁻¹. Available water resources are 1,592

Maestre-Valero, J. F., D. Martínez-Granados, V. Martínez-Álvarez, and J. Calatrava. 2013. "Socio-Economic Impact of Evaporation Losses from Reservoirs Under Past, Current and Future Water Availability Scenarios in the Semi-Arid Segura Basin." *Water Resources Management* 27 (5): 1411–1426.

hm³ yr⁻¹ sourced surface water (623 hm³ yr⁻¹; 39.1%), groundwater (200 hm³ yr⁻¹; 12.6%), reuse (146 hm³ yr⁻¹; 9.2%), desalinated (83 hm³ yr⁻¹; 5.2%) and external water sources from the adjacent Tajo basin (540 hm³ yr⁻¹; 33.9%). These available water resources are not enough to satisfy the water demand in the Segura basin, estimated at 1,962 hm³ yr⁻¹. Water demand is to cover crop irrigation (1,662 hm³ yr⁻¹; 84.6%), urban use (217 hm³ yr⁻¹; 11.1%), industrial use (23 hm³ yr⁻¹; 1.2%) and environmental use (60 hm³ yr⁻¹; 3.1%). This structural deficit is covered by non-renewable groundwater pumping (approximately 140 hm³ yr⁻¹) and with deficit water application to crops (approximately 230 hm³ yr⁻¹). Considering this deficit application of irrigation water, the real irrigation demand is 1432 hm³ yr⁻¹. These data about water resources availability apply in theory only. They are used for planning purposes only and represent an unrealistic optimistic scenario since there has been a downward trend in renewable water resources over the last decades and the TSA has never transferred the maximum legal water allotment from the Tajo basin.

Two types of water reservoirs can be found in the Segura basin. On the one hand, there are small reservoirs that are typically used for irrigation purposes (agricultural water reservoirs, AWRs). They usually have a moderate surface area (from 0.1 to 3 ha), a shallow depth (from 5 to 10 m) and are designed to help cope with the variable water allotments and periods without supply, guaranteeing water all year round. Such small-scale reservoirs are very numerous in arid and semi-arid regions (Krol et al., 2011). According to Martínez-Alvarez et al. (2008), there are about 1.5×10^4 AWRs across the Segura basin.

On the other hand, there are Great Dams (GDs), owned and managed by the Confederación Hidrográfica del Segura (CHS), which are instream large-sized reservoirs with a surface area ranging from 0.2 to 15 km² and a storage capacity from 0.07 to 250 hm³. To simplify the analysis, in this study we consider the largest 14 of the 33 extant GDs in the Segura basin (totalling 93% of the area covered by GDs and 96% of the basin's total storage capacity).

Conversely to great dams, small reservoirs depict an insurance role against irrigation water supply uncertainty by maintaining their evaporative surface regardless the water scarcity condition. In a case study with unfavourable CC predictions (reduction

Maestre-Valero, J. F., D. Martínez-Granados, V. Martínez-Álvarez, and J. Calatrava. 2013. "Socio-Economic Impact of Evaporation Losses from Reservoirs Under Past, Current and Future Water Availability Scenarios in the Semi-Arid Segura Basin." *Water Resources Management* 27 (5): 1411–1426.

of 10% in annual precipitation and increase of 15% in reference evaporation by 2100), Krol et al. (2011) showed that CC impacts on water availability from small reservoirs might exceed impacts from great dams. Accordingly, the effect of evaporation losses on water availability in future scenarios should be analysed separately for small reservoirs and great dams.

For further information on the physical environment, the agricultural sector, the water budget or the water reservoirs in the Segura basin, see Martínez-Granados et al. (2011) and Calatrava and Martínez-Granados (2012).

3. Climate change predictions for the Segura basin

According to IPCC (2007), a very broad spectrum of future changes in regional temperature and precipitation are possible. However, the average modelling results coming from the most likely predictions provide good reference values for defining future possible regional CC scenarios (Alcamo et al., 2007).

Many studies indicate that the Mediterranean basin will be the most severely affected region in Europe (Giorgi and Lionello, 2008). The already hot and semi-arid climate of Mediterranean areas is expected to become still warmer and drier, threatening its waterways, aquifers, hydropower, agricultural production and timber harvests (Moreno et al., 2005; IPCC, 2007; 2008).

Future water availability forecasts suggest that water availability will decrease by up to 16% in the 2030 scenario (MIMAM, 2000) and by up to 28% in the 2060 scenario (Moreno et al., 2005) compared with the current situation in the basin. These projections match IPCC predictions.

Dealing with temperature projections, the mean air temperature is expected to increase by 1 °C and 2.5 °C in the 2030 and 2060 scenarios, respectively (MIMAM, 2000; Moreno et al., 2005). These temperature increases were expected to raise the evaporation rate over open water by 3.1% and 7.7%, in the Segura basin respectively.

Maestre-Valero, J. F., D. Martínez-Granados, V. Martínez-Álvarez, and J. Calatrava. 2013. "Socio-Economic Impact of Evaporation Losses from Reservoirs Under Past, Current and Future Water Availability Scenarios in the Semi-Arid Segura Basin." *Water Resources Management* 27 (5): 1411–1426.

4. Methodology

The proposed methodological approach focuses on the comparative analysis of scenarios. Scenarios are hypothetical sequences of events used to explore the unpredictable and uncontrollable features of change. Scenarios can form a picture of the future, which should not, however, be construed as a prediction or forecast (Menzel and Matovelle, 2010). Five scenarios of increased scarcity in water availability were considered (Section 4.1).

We have used a multidisciplinary approach to study the hydrological and economic impacts of evaporation losses on the Segura basin under the defined scenarios. This approach combines (i) the application of energy balance models for assessing the effect of CC on evaporation from water bodies, (ii) the use of Class-A pan data and regionally calibrated pan coefficients for determining the evaporation loss at a regional scale and (iii) non-linear mathematical programming modelling to evaluate the economic impact of such losses on irrigated agriculture.

In order to focus the economic analysis on the impact of evaporation losses and to distinguish between impacts from AWRs and from GDs, we have considered three different "evaporation situations" for each water availability scenario:

- D. Situation without evaporation water losses.
- E. Situation with evaporation losses from GDs. This is the same water availability situation considered by CHS, the regional water agency responsible for water planning and management in the Segura basin.
- F. Situation with losses from both GDs and AWRs.

Situation A is not realistic but has been considered as a benchmark for comparison with evaporation situations B and C. The difference between the economic values associated with situations A and B is a measure of the impact of water evaporation losses from GDs. The difference between situations B and C is a measure of the economic impact of water evaporation losses from AWRs. Finally, the difference between situations A and C is a measure of the impact of water evaporation losses from both GDs and AWRs.

Maestre-Valero, J. F., D. Martínez-Granados, V. Martínez-Álvarez, and J. Calatrava. 2013. "Socio-Economic Impact of Evaporation Losses from Reservoirs Under Past, Current and Future Water Availability Scenarios in the Semi-Arid Segura Basin." *Water Resources Management* 27 (5): 1411–1426.

4.1. Water availability scenarios

Water availability scenarios (SC) are defined as follows (Table 1):

1. Recent past scenario (SC1). Scenario 1 represents the theoretical baseline scenario and is based on official irrigation water resources data from the Spanish National Hydrological Plan (MIMAM, 2001). This National Plan is based on the average annual renewable water resources inflows for 1940-1996 and assumes that the Tajo-Segura Aqueduct always transfers its maximum legal water allotment for irrigation ($399.8 \text{ hm}^3 \text{ yr}^{-1}$).
2. Scenario 2 (SC2) called "current situation" assumes that the TSA only serves half of its maximum transferable water allotment, and that the basin surface and groundwater resources are 20% less than in the baseline scenario. These reductions are equivalent to the average annual renewable water resources inflows for the 1980-2005 period (a 20% decrease over 1940-1996) and the average amount of water effectively transferred for irrigation by the TSA between 1979 and 2009. This current scenario is equivalent to a 27.5% reduction in water availability in the basin with respect to the baseline scenario (Table 1).
3. Scenario 3 (SC3) is equivalent to SC2, except that it considers that no irrigation water is transferred to the Segura basin through the TSA. Due to both increasing water scarcity and growing demands in the Tajo basin, legislative processes are now under discussion that could result in the cancellation of the TSA water transfer, at least for non-domestic purposes, making this a feasible scenario in the near future. This scenario is equivalent to a 41.2% reduction in water availability with respect to the baseline scenario (Table1).
4. Scenario 4 (SC4) is the projected effect of CC on available water resources and the evaporation rate from open water for 2030, plus TSA water transfer cancellation. According to MIMAM (2000), the average decrease in water resources for the Segura basin estimated for 2030 is 16% compared to the current scenario, equivalent to a 32.8% reduction in the basin's own surface and groundwater resources compared with the baseline scenario. This scenario amounts to a total decrease of 49.7% in

Maestre-Valero, J. F., D. Martínez-Granados, V. Martínez-Álvarez, and J. Calatrava. 2013. "Socio-Economic Impact of Evaporation Losses from Reservoirs Under Past, Current and Future Water Availability Scenarios in the Semi-Arid Segura Basin." *Water Resources Management* 27 (5): 1411–1426.

5. Segura basin resources for agriculture with respect to the baseline scenario (Table1). The evaporation rate is expected to rise by 3.1% in this scenario, as justified later.
6. Scenario 5 (SC5) is similar to SC4 above, except that it considers the effect of CC for the 2060 horizon. The projected decrease of water resources in the Segura basin for this time horizon is 28% against the current situation (Moreno et al., 2005), equivalent to a 42.4% reduction in the basin's own resources with respect to the baseline scenario. Adding the effect of TSA cancellation, the decrease in total Segura basin resources with respect to the baseline scenario is 56.0% (Table 1). Additionally, the evaporation rate is expected to rise by 7.7% in this scenario.

In order to simplify the analysis, no variations have been considered in desalinated water resources or water demand for irrigation, although they could increase in the medium to long term.

Table 1. Available water resources by source and percentage water availability in proposed scenarios with respect to the baseline scenario in the Segura basin. TSA: Tajo Segura Aqueduct.

Water resources	Water availability scenario									
	Scenario 1		Scenario 2		Scenario 3		Scenario 4		Scenario 5	
	Baseline scenario		Current situation		Current situation without TSA		2030 scenario without TSA		2060 scenario without TSA	
	Hm ³	%	Hm ³	%	Hm ³	%	Hm ³	%	Hm ³	%
Surface resources	538.6	100	430.9	80	430.9	80	361.9	67,2	310.2	57.6
Tajo-Segura Aqueduct	399.8	100	199.9	50	0	0	0	0	0	0
Groundwater	411.8	100	324.4	80	324.4	80	276.8	67,2	237.2	57.6
Desalinated water	53.6	100	53.6	100	53.6	100	53.6	100	53.6	100
Treated wastewater	28.6	100	28.6	100	28.6	100	28.6	100	28.6	100
Total resources	1,432.4	100	1,042.4	72.8	842.5	58.8	720.9	50.3	626.6	44.0

Maestre-Valero, J. F., D. Martínez-Granados, V. Martínez-Álvarez, and J. Calatrava. 2013. "Socio-Economic Impact of Evaporation Losses from Reservoirs Under Past, Current and Future Water Availability Scenarios in the Semi-Arid Segura Basin." *Water Resources Management* 27 (5): 1411–1426.

4.2. Effect of climate change on evaporation from water bodies

We applied a modelling approach based on the mathematical formulation of the water body energy balance (Martínez-Alvarez et al., 2007) in order to determine the effect of the increasing air temperature (T_a) on both the water surface temperature (T_s) and the evaporation rate (E) for the 2030 and 2060 scenarios. The model runs on daily basis, and is fed by daily meteorological data (air temperature, relative humidity, wind speed and solar global radiation) and the water body geometry (surface area, S , and depth, D). Martínez-Alvarez et al. (2008) reported that this modelling approach could be applied to accurately derive E for shallow water bodies in places where standard meteorological data are available.

The effect of CC on E was addressed by comparing simulations for situations with and without T_a change. We conducted the analysis at three locations fairly representative of the Segura basin, namely San Cayetano (coastal plain), Murcia (Segura River Valley) and Jumilla (north of the basin), for the 2000–2004 period and for different combinations of S and D . Daily meteorological data at those stations were obtained from the *Servicio de Información Agraria de Murcia* website (<http://siam.imida.es>). The model was fed with real meteorological data, and data with 1 °C and 2.5 °C increases in daily T_a were simulated in order to determine the increases in T_s and E for the 2030 and 2060 scenarios, respectively (see Section 2).

A total of 270 simulations were performed over the 5-year period for the three locations, three temperature scenarios, and several geometrical configurations representative of the AWRs commonly encountered in the Segura basin: two depths ($D = 5$ and 10 m) and three surface areas ($S = 10^3$, 10^4 and 10^5 m²). The increase in E was quite similar under all the studied combinations and then its average values were considered as the expected increases in E corresponding to the 2030 and 2060 scenarios. In absence of a better estimation, these values were also applied for GDs.

4.3. Calculating evaporation losses

Regional evaporation losses from both AWRs and GDs were calculated using Class-A pan evaporation data and regionally calibrated pan coefficients (Martínez-

Maestre-Valero, J. F., D. Martínez-Granados, V. Martínez-Álvarez, and J. Calatrava. 2013. "Socio-Economic Impact of Evaporation Losses from Reservoirs Under Past, Current and Future Water Availability Scenarios in the Semi-Arid Segura Basin." *Water Resources Management* 27 (5): 1411–1426.

Alvarez et al., 2008; Lowe et al., 2009). Evaporation from AWRs was calculated for the 2000-2006 period using the AWRs database and the methodology proposed by Martínez-Alvarez et al. (2008). Evaporation from GDs was determined following the methodology proposed by Martínez-Granados et al. (2011).

For future scenarios, the expected rise in E for the 2030 and 2060 horizons was applied. The AWR total evaporative area was the same, since AWRs will continue to serve as emergency reserve under heavier water stressed conditions. There was only one exception: AWRs placed in areas supplied exclusively with resources from the TSA were considered empty in the scenarios with water transfer cancellation. Regarding GDs, their evaporative area was decreased for each scenario taking into account the decrease in total water resources with respect to the baseline scenario and following the bathymetric curve for each GD. For further information about the evaporation losses calculation, see Martínez-Granados et al. (2011).

4.4. Obtaining the economic value of water use

We evaluated the economic impact of evaporation losses under each water availability scenario using a non-linear mathematical programming model that simulates the economic use of water in the irrigated agriculture of the Segura basin. For detailed descriptions of the model used, including its mathematical structure, its technical and economic coefficients and its calibration process, see Martínez-Granados et al. (2011) and Calatrava and Martínez-Granados (2012). We have expanded that model to include the labour requirements of each crop in order to also compute results in terms of agricultural employment. In this study, we used the above model to simulate the economic impact of the reduction in the volume of available water caused by evaporation losses in each water demand unit of the basin. This way, we were able to estimate the economic value of such losses in each proposed water availability scenario. The economic effect of evaporation losses from reservoirs was calculated by comparing simulations for situations with and without evaporation losses, making a distinction between impacts from AWRs and from GDs (situations A, B and C). The model was also used to estimate the economic impact of the reduced water availability induced by increased water scarcity, a feature of the considered basin scenarios.

Maestre-Valero, J. F., D. Martínez-Granados, V. Martínez-Álvarez, and J. Calatrava. 2013. "Socio-Economic Impact of Evaporation Losses from Reservoirs Under Past, Current and Future Water Availability Scenarios in the Semi-Arid Segura Basin." *Water Resources Management* 27 (5): 1411–1426.

4.5. Study areas and results aggregation

For water planning and management purposes, the Segura basin is divided into 63 agricultural water demand units that are characterized by their location and the water resources they use (MIMAM, 2001). Evaporation losses were estimated at the water demand unit level, as was the economic valuation of water. The results were then aggregated and presented for the entire Segura basin.

4.6. Some considerations about the proposed methodology and scenarios

Despite of its numerous advantages, the proposed methodological approach has some limitations. The approach is limited by the weaknesses inherent to the methodologies used for estimating evaporation losses and valuing irrigation water, as well as the uncertainty of the CC predictions. However, these limitations are outweighed by the sound accuracy level for an assessment on such a large scale (basin level) and by the use of official meteorological, hydrologic and economic data.

Other limitations derive from the difficulty of considering some of the technical and economic coefficients used in our economic modelling for future 2060 scenarios. We have used partial equilibrium modelling, where crop prices and yields are evaluated at their historical average and production costs are evaluated at their present values. Similarly, we have considered neither changes in crop water requirements nor potential adaptation strategies for farmers. In fact, only changes in crop allocation and land abandonment have been considered as a response to changes in water availability. However, we can guess how some of these factors might evolve in qualitative terms. For example, despite the increasing liberalization of world markets, the area's intensive export-driven horticulture is likely to see price increases as a result of reduced irrigated area, thus partly limiting the extent of the economic impact of increased scarcity. On the contrary, a quite likely increase in crop water requirements or in production costs would increase the economic impact of future scarcity scenarios. Note also that some adaptation strategies are more limited than in other areas as, for example, the potential for new water supply sources is quite reduced or because modern irrigation technologies and deficit irrigation practices are widespread in the basin. This strongly restricts the potential for further water saving in response to reduced water availability. However,

Maestre-Valero, J. F., D. Martínez-Granados, V. Martínez-Álvarez, and J. Calatrava. 2013. "Socio-Economic Impact of Evaporation Losses from Reservoirs Under Past, Current and Future Water Availability Scenarios in the Semi-Arid Segura Basin." *Water Resources Management* 27 (5): 1411–1426.

there is a greater potential for technical solutions for reducing evaporation losses (see the Conclusions Section).

5. Results

5.1. Effect of climate change on evaporation from water bodies

The almost three hundred simulations resulted in expected average water surface temperature (T_s) rises of 0.71 ± 0.10 °C and 1.88 ± 0.12 °C for the 2030 and 2060 CC scenarios, respectively. These values are in agreement with figures reported by Schindler and Donahue (2006) in Canada for similar expected air temperature increases. There was a very slight variability in the mean annual T_s for the studied years and different combinations of S and D , where location in the Segura basin was responsible for most of the standard deviation.

Table 2 shows the effect of CC on evaporation (E) from water bodies for the 2030 and 2060 CC scenarios, with respect to the average values for the 2000–2004 period. The table separates the results by locations and by S values. It only includes the average values for water depths of 5 and 10 m since the effect of this variable on annual evaporation was practically negligible. According to Martínez-Alvarez et al. (2007), there were significant differences in the annual E due to inter-annual climate variations, the station location and the surface area of the reservoirs. Additionally, these differences between the three temperature scenarios were evident. However, the increase in annual E for each temperature scenario was quite similar for all studied combinations, resulting in low and uniform values of standard deviation. Therefore, we applied rises in annual E for the 2030 and 2060 scenarios equivalent to the average E value for the studied combinations (+3.1% and +7.7% respectively). As mentioned above, these values were also applied to GDs.

Maestre-Valero, J. F., D. Martínez-Granados, V. Martínez-Álvarez, and J. Calatrava. 2013. "Socio-Economic Impact of Evaporation Losses from Reservoirs Under Past, Current and Future Water Availability Scenarios in the Semi-Arid Segura Basin." *Water Resources Management* 27 (5): 1411–1426.

Table 2. Average value and standard deviation for the absolute and relative increase in annual evaporation from water bodies for the 2030 and 2060 scenarios at three locations in the Segura basin and for surface areas of 10^3 , 10^4 and 10^5 m².

Meteoro-logical station	Reservoir surface area (m ²)	2000-04	2030 scenario			2060 scenario		
		<i>E</i>	<i>E</i>	ΔE		<i>E</i>	ΔE	
		mm	mm	mm	%	mm	mm	%
San Cayetano	10 ³	1,788±55	1,841±58	+53±3	+2.99±0.04	1,925±60	+136±3	+7.62±0.04
	10 ⁴	1,694±54	1,745±57	+52±2	+3.07±0.05	1,825±60	+131±2	+7.76±0.05
	10 ⁵	1,615±54	1,665±57	+50±2	+3.11±0.05	1,742±61	+126±2	+7.83±0.05
Murcia	10 ³	1,576±57	1,624±59	+48±2	+3.04±0.05	1,698±62	+122±3	+7.74±0.05
	10 ⁴	1,481±56	1,527±59	+46±2	+3.10±0.05	1,597±60	+116±3	+7.81±0.05
	10 ⁵	1,405±55	1,449±57	+44±2	+3.13±0.05	1,515±57	+111±3	+7.82±0.05
Jumilla	10 ³	1,598±80	1,648±83	+50±2	+3.13±0.05	1,721±86	+123±3	+7.66±0.04
	10 ⁴	1,503±78	1,550±81	+48±2	+3.18±0.05	1,619±84	+116±3	+7.72±0.05
	10 ⁵	1,426±77	1,471±81	+46±2	+3.22±0.05	1,536±83	+110±3	+7.76±0.05
Average values =				+49±3	+3.11±0.07		+121±8	+7.74±0.07

8.1. Evaporation assessment

Table 3 shows the water availability for irrigation and evaporation losses from reservoirs in the Segura basin under the three water evaporation situations (A, B and C) for each scenario (SC1 to SC5). Situation A adds evaporation losses in GDs to the gross water availability in each scenario (situation B), whereas situation C deducts evaporation losses in AWRs from situation B. Reductions in the water availability under each scenario generally resulted in reductions of the free water surface subject to evaporation, hence reducing water losses. In relative terms, however, notable increases in evaporation losses were observed.

Maestre-Valero, J. F., D. Martínez-Granados, V. Martínez-Álvarez, and J. Calatrava. 2013. "Socio-Economic Impact of Evaporation Losses from Reservoirs Under Past, Current and Future Water Availability Scenarios in the Semi-Arid Segura Basin." *Water Resources Management* 27 (5): 1411–1426.

Table 3. Water availability and evaporation losses for the proposed water availability scenarios (SC1 to SC5) and evaporation situations (A, B and C) in the Segura basin.

Water availability scenario	Water availability (hm ³)			Evaporation losses (hm ³)		
	A; No evaporation losses	B; Minus losses in GDs	C; Minus losses in AWRs	Total losses (A – C)	Losses in GDs (A – B)	Losses in AWRs (B – C)
SC1	1,460.16	1,432.40	1,365.46	94.70	27.76	66.94
SC2	1,066.09	1,042.42	975.48	90.61	23.67	66.94
SC3	866.19	842.52	790.48	75.71	23.67	52.04
SC4	743.65	720.87	668.68	74.97	22.78	52.19
SC5	651.54	629.63	575.25	76.29	21.91	54.38

Evaporation from AWRs was the same in the first two scenarios (Table 3). In spite of the TSA supplying on average only half of its water allotment in SC2, there was no decrease in the volume of stored water in AWRs to guarantee their insurance role. Hence, we considered the same volume of water as in SC1 in the water loss calculation. However, the percentage of evaporation losses with respect to the water availability increased in the SC2 due to the reduction of water availability in the basin.

Evaporation from AWRs was calculated to decrease by approximately 20% from SC1 and SC2 to SC3, SC4 and SC5 (Table 3), these reductions being mainly attributed to the suppression of the TSA in the last three scenarios. The TSA cancellation scenario also produced a decrease in the percentage evaporation losses from AWRs from SC2 to SC3 as a consequence of the removal of water losses from AWRs located at sites irrigated from this water source only.

In general, the trend in the percentage evaporation losses from AWRs with respect to the total water availability in each scenario was upward and ranges from 4.6% to 8.3%.

On the other hand, the evaporative area of GDs also decreased for future scenarios as a consequence of the decrease in water resources, resulting in decreasing annual evaporation of water from GDs ranging from 27.76 hm³ yr⁻¹ in SC1 to 21.91 hm³ yr⁻¹ in SC5. Particularly for SC2 and SC3, evaporation from GDs was unchanged since the suppression of the water transferred from the Tajo basin in SC3 did not affect the evaporation from GDs, as they are not supplied with water from the channel. As for

Maestre-Valero, J. F., D. Martínez-Granados, V. Martínez-Álvarez, and J. Calatrava. 2013. "Socio-Economic Impact of Evaporation Losses from Reservoirs Under Past, Current and Future Water Availability Scenarios in the Semi-Arid Segura Basin." *Water Resources Management* 27 (5): 1411–1426.

AWRs, however, the percentage evaporation losses from GDs with respect to the water availability increased from SC1 to SC5.

On average for all scenarios, water evaporation from GDs is 41% of total evaporation. Under the current scenario, evaporation from AWRs is almost three times losses from large reservoirs, and its relative weight will increase as water resources will decrease in future scenarios. This is due to the insurance role of AWRs against irrigation water supply uncertainty, a role that will be even more important in future scenarios and is likely to mean that they will maintain most of their evaporative surface, resulting in an increasing weight of evaporation from AWRs (Krol et al., 2011).

In short, considering the worst-case scenario (2060 horizon), water availability in the basin might be reduced by up to 40% with respect to the current water availability scenario (SC2) and the percentage of total water losses from GDs and AWRs could reach 11.7% of the basin's water availability.

8.2. Economic value of evaporation losses under the different scenarios

In general for all the scenarios, water loss from evaporation led to a reduction in the (i) market value of agricultural production in the basin, (ii) farm net margin, (iii) cultivated area and (iv) agricultural employment. The magnitude of such reductions increased from SC1 to SC5 since it is strongly dependent on water availability, as shown in Table 4.

Maestre-Valero, J. F., D. Martínez-Granados, V. Martínez-Álvarez, and J. Calatrava. 2013. "Socio-Economic Impact of Evaporation Losses from Reservoirs Under Past, Current and Future Water Availability Scenarios in the Semi-Arid Segura Basin." *Water Resources Management* 27 (5): 1411–1426.

Table 4. Economic impact of water losses by evaporation from AWRs, GDs and totals for the proposed water availability scenarios in the Segura basin.

Water availability scenario	Evaporation situations	Value of production (million € per year)	Net margin (million € per year)	Cultivated Area (ha)	Agricultural labour (annual equivalent labour units)
SC1	A. Reference (no evaporation)	2,589	1,080	233,865	80,292
	B. Minus losses in GDs	2,570	1,074	230,208	79,458
	C. Minus losses in AWRs	2,477	1,037	220,193	75,958
SC2	A. Reference (no evaporation)	2,136	914	175,318	63,250
	B. Minus losses in GDs	2,112	905	172,061	62,333
	C. Minus losses in AWRs	2,002	865	161,906	58,542
SC3	A. Reference (no evaporation)	1,768	776	143,307	51,792
	B. Minus losses in GDs	1,722	754	139,908	50,375
	C. Minus losses in AWRs	1,610	707	131,383	46,625
SC4	A. Reference (no evaporation)	1,613	716	124,216	46,167
	B. Minus losses in GDs	1,567	695	120,755	44,792
	C. Minus losses in AWRs	1,441	642	112,799	40,833
SC5	A. Reference (no evaporation)	1,479	663	109,924	41,625
	B. Minus losses in GDs	1,432	642	106,647	40,167
	C. Minus losses in AWRs	1,296	583	98,116	36,000

The resulting reduction in water availability for the scenarios had important economic impacts on the basin's irrigation (Table 4). Let us compare evaporation situation C in each of the five water availability scenarios. We can observe that decreasing water availability results in progressive reductions of all the economic indicators considered. For example, if we compare the worst predicted scenario (SC5) with the current situation (SC2), the market value of agricultural production is reduced by $706 \cdot 10^6 \text{ € yr}^{-1}$ (35.3%), the farmers' net margin by $706 \cdot 10^6 \text{ € yr}^{-1}$ (32.6%), the irrigated area by 63,790 ha (39.4%) and agricultural employment by 22,542 annual equivalent labour units each year (38.5%).

Maestre-Valero, J. F., D. Martínez-Granados, V. Martínez-Álvarez, and J. Calatrava. 2013. "Socio-Economic Impact of Evaporation Losses from Reservoirs Under Past, Current and Future Water Availability Scenarios in the Semi-Arid Segura Basin." *Water Resources Management* 27 (5): 1411–1426.

The percentage reduction in the market value of agricultural production in the basin due to evaporation losses increased from 3.6% in SC1 to 9.2% in SC5 and from 0.7% to 3.1% in AWRs and GDs, respectively. The ratio between the two suggests that losses from AWRs are relatively much greater than losses from GDs. On average for all water availability scenarios, the global reduction of the market value of agricultural production due to evaporation losses is $152 \cdot 10^6 \text{ € yr}^{-1}$, where AWRs account on average for $115 \cdot 10^6 \text{ € yr}^{-1}$. Results in terms of foregone farm net margin paint a rather similar picture to outcomes for the market value of foregone agricultural production for all the scenarios. This is because the ratio between these two variables is fairly stable in the Segura basin at around 40%.

As a result of decreased water availability in the proposed scenarios, the cultivated area showed a quasi-linear decline of up to 123,941 ha (47% reduction) between SC1 and SC5 (Table 4). The effect of evaporation losses on the cultivated area also increases in line with water scarcity. On average for all water availability scenarios, the water losses result in about 12,446 ha not being cultivated in the basin, where 9,036 ha (approximately 72.5%) are attributed to evaporation losses from AWRs.

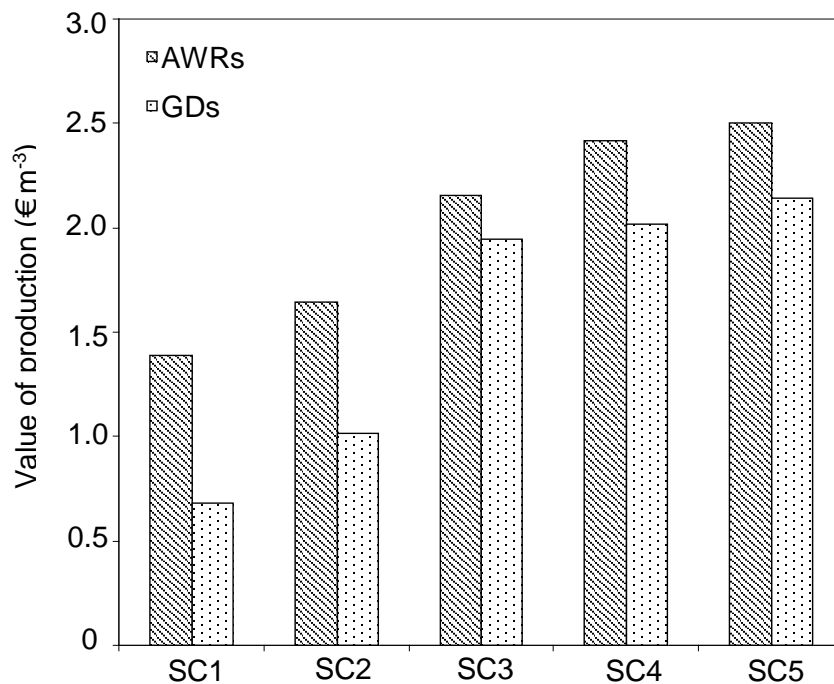
The decrease in water availability in the basin from SC1 to SC5 led to a reduction of 38,667 annual equivalent labour units (52% reduction). The percentage reduction due to evaporation losses increased from 5.4% to 13.5% from SC1 to SC5. On average, the global water losses associated with all five scenarios resulted in an annual reduction of 5,033 annual equivalent labour units, where on average 3,833 (between 75 – 80%) are attributed to AWRs (Table 4).

In short, considering the 2060 horizon (SC5), the worst-case scenario, the effect of evaporation losses from reservoirs amounts to a 12.4% reduction in the value of foregone agricultural production, 12.1% in foregone farm net margin, 10.7% in the cultivated area and 13.5% in the basin's agricultural employment.

Maestre-Valero, J. F., D. Martínez-Granados, V. Martínez-Álvarez, and J. Calatrava. 2013. "Socio-Economic Impact of Evaporation Losses from Reservoirs Under Past, Current and Future Water Availability Scenarios in the Semi-Arid Segura Basin." *Water Resources Management* 27 (5): 1411–1426.

Figure 1 shows the value of average production per unit of water that is lost as evaporation from AWRs and GDs for the studied water availability scenarios. Apart from being greater in both absolute and relative terms, water evaporated from AWRs is also more valuable than that lost from GDs in all scenarios (Fig. 1). For example, water evaporated from GDs in the future CC projections (SC4 and CS5) caused an average loss of 2.019 €/m³ and 2.145 €/m³ respectively, whereas water evaporated from AWRs caused a loss of 2.414 €/m³ and 2.501 €/m³ respectively. This happened because AWRs are mostly located in the most profitable areas and water losses from GDs happen before water is transported to the irrigated areas and distributed to the farms. As the marginal value of water decreases with water availability, the “per m³” economic impact of the first reduction in water availability (evaporation losses from GDs) is always less than the “per m³” impact of another reduction later on (evaporation losses from AWRs).

Figure 1. Value of average production per unit of water evaporation loss from AWRs and GDs for the studied water availability scenarios



Maestre-Valero, J. F., D. Martínez-Granados, V. Martínez-Álvarez, and J. Calatrava. 2013. "Socio-Economic Impact of Evaporation Losses from Reservoirs Under Past, Current and Future Water Availability Scenarios in the Semi-Arid Segura Basin." *Water Resources Management* 27 (5): 1411–1426.

6. Conclusions

The present study provides a useful analysis that illustrates both the important role played by evaporation losses from reservoirs from the hydrological and economic perspective in the semi-arid Segura basin today and their clear and marked upward trend for future scenarios considering CC predictions and socio-political issues.

From a hydrological perspective, reductions in water availability in possible future scenarios leads to a decrease in the total amount of evaporation losses but also to a significant increase in the relative importance of water losses, reaching 11.7% of available water resources for irrigation in the basin for the worst-case scenario (SC5). For all scenarios, evaporation from AWRs more than doubles respective losses from GDs, and its relative weight increases as water resources decrease in future scenarios. From an economic perspective, the impact of evaporation losses is very significant, especially in more unfavourable water availability scenarios, with sizeable reductions in the (i) market value of agricultural production, (ii) farm net margin, (iii) cultivated area and (iv) agricultural employment.

These major hydrologic and economic impacts highlight the need to take into account evaporation losses for water management and planning in the Segura basin as much in the current situation as in the future projections. Besides, since evaporation losses from small reservoirs are not considered by water agencies, nor incorporated in their water budgets, the methodologies for assessing management alternatives to improve the technical and economic efficiency of water use at different levels (basin, irrigated districts and farms) would benefit by considering such evaporation losses.

In this sense, an accurate water management and planning for long-term scenarios should be based on a flexible, transparent and comprehensive multi-criteria framework (Getirana et al., 2008; Wang et al. 2008; Opricovic, 2009; Tsakiris and Spiliotis, 2011) and thus should include the impact of evaporation losses from reservoirs, especially for arid and semi-arid water stressed regions.

The results in this study emphasize the need for technical alternatives aimed at reducing evaporation from reservoirs in water stressed regions such as the Segura basin. Despite the wide range of techniques proposed for this purpose (Brown, 1988;

Maestre-Valero, J. F., D. Martínez-Granados, V. Martínez-Álvarez, and J. Calatrava. 2013. "Socio-Economic Impact of Evaporation Losses from Reservoirs Under Past, Current and Future Water Availability Scenarios in the Semi-Arid Segura Basin." *Water Resources Management* 27 (5): 1411–1426.

Craig, 2005), the use of suspended shade cloth covers (Martínez-Alvarez et al., 2010) and floating covers (Segal and Burnstain, 2010) looks to be feasible and efficient for small regular reservoirs like AWRs, whilst the use of monolayers spontaneously self-spread over the water surface, appears to be better suited for medium-sized and great reservoirs (Barnes, 2008).

Additionally, the progressive water availability reduction under future scenarios is expected to increase the competition for water resources, raising the economic value of evaporated water. This should affect the profitability of this kind of measures for reducing evaporation.

However, the most common and planned strategies for adapting to increases in water stress are still supply-side measures such as impounding rivers to form instream reservoirs to increase water storage (Santos et al., 2002; Moreno et al., 2005; IPCC, 2008). This strategy represents an increase in water surface, which, together with future increases in the evaporation rate, could result in additional water losses. This loss could counterbalance other positive effects of increasing water storage in the basin water balance, resulting in even less water availability for very stressed basins.

7. Acknowledgements

The authors wish to thank two anonymous referees for their comments and suggestions and Dr. Ana Iglesias for her valuable orientation during early stages of this research. The authors acknowledge the Ministerio de Ciencia e Innovación (Spain), the Spanish National Institute for Agricultural and Food Research and Technology (INIA) and FEDER (Fondo Europeo de Desarrollo Regional) for the financial support of this study through the research projects AGL2010-15001 and RTA2010-00109-C04-03. During the elaboration of this research J.F. Maestre-Valero had a research grant funded by the Spanish Government (AP2007-03428).

8. References

Amini Fasakhodi A, Nouri SH, Amini M (2010) Water Resources Sustainability and Optimal Cropping Pattern in Farming Systems; A Multi-Objective Fractional Goal Programming Approach. *Water Resour Manage* 24(15): 4639-4657

Maestre-Valero, J. F., D. Martínez-Granados, V. Martínez-Álvarez, and J. Calatrava. 2013. "Socio-Economic Impact of Evaporation Losses from Reservoirs Under Past, Current and Future Water Availability Scenarios in the Semi-Arid Segura Basin." *Water Resources Management* 27 (5): 1411–1426.

- Alcamo J, Döll P, Henrichs T, Kaspar F, Lehner B, Rösch T, Siebert S (2003) Global estimates of water withdrawals and availability under current and future "business-as-usual" conditions. *Hydrol Sci J* 48: 339–348
- Alcamo J, Flörke M, Marker M (2007) Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic change. *Hydrol Sci J* 52: 247–275
- Barnes GT (2008) The potential of monolayers to reduce the evaporation of water from large water storages. *Agric Water Manage* 95:339-353
- Brown JAH (1988) The Potential for Reducing Open Water Evaporation Losses: A Review. *Hydrology and Water Resources Symposium*. ANU, Canberra, Australia, 108-115
- Calatrava, J., Martínez-Granados, D. (2012) El valor de uso del agua en el regadío de la cuenca del Segura y en las zonas regables del trasvase Tajo-Segura. *Economía Agraria y Recursos Naturales* 12(1): 5-32
- Carmona G, Varela-Ortega C, Bromley J (2011) The Use of Participatory Object-Oriented Bayesian Networks and Agro-Economic Models for Groundwater Management in Spain. *Water Resour Manage*, 25: 1509-1524
- CHS (2007) Estudio General sobre la Demarcación Hidrográfica del Segura. Confederación Hidrográfica del Segura, Murcia, Spain
- Christodoulou SE (2011) Water Resources Conservancy and Risk Reduction Under Climatic Instability. *Water Resour Manage* 25:1059–1062
- Craig I, Green A, Scobie M, Schmidt E (2005) Controlling Evaporation Loss from Water Storages. NCEA Publication No. 1000580/1, Queensland, Australia
- Getirana ACV, Malta VF, Azevedo JPS (2008) Decision process in a water use conflict in Brazil. *Water Resour Manage* 22:103–118
- Giorgi F, Lionello P (2008) Climate change projections for the Mediterranean region. *Global Planet Change* 63: 90-104
- Gökbulak F, Özhan S (2006) Water loss through evaporation from water surfaces of lakes and reservoirs in Turkey. *E-Water: Official Publication of the European Water Association* [on line]. <http://www.ewaonline.de>. ISSN 1994-8549
- Gupta V, Tadros M, Bradshaw RW, Showalter SK, Miller JE, Evans L, Sasaki DY (2002). Progress Report: Advanced Concepts Group Fy01-1362-LDRD, Solutions to National and Global Security Issues Based on Limited Freshwater Resources.

Maestre-Valero, J. F., D. Martínez-Granados, V. Martínez-Álvarez, and J. Calatrava. 2013. "Socio-Economic Impact of Evaporation Losses from Reservoirs Under Past, Current and Future Water Availability Scenarios in the Semi-Arid Segura Basin." *Water Resources Management* 27 (5): 1411–1426.

- SAND2002-0781. Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM
- Iglesias A, Garrote L, Flores F, Moneo M (2007) Challenges to Manage the Risk of Water Scarcity and Climate Change in the Mediterranean. *Water Resour Manage* 21(5):775-788
- Iglesias A (2009) Policy issues related to climate change in Spain. In Dinar A. and Albiac J; Policy and strategic behaviour in water resource management; Earthscan, London, United Kingdom, ISBN: 978-1-84407-669-7
- IPCC (2007) Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press; 2007b. p. 976
- IPCC (2008) Climate Change and Water Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva; 2008. p. 210
- Jurak D (1989) Effect of climate change on evaporation and water temperature. Proceedings of the Conference on Climate and Water, Helsinki, Vol I:138-148
- Krol, MS, de Vries MJ, van Oel PR, Araújo JC (2011) Sustainability of Small Reservoirs and Large Scale Water Availability Under Current Conditions and Climate Change. *Water Resour Manage* 25:3017–3026
- Lowe LD, Webb JA, Nathan RJ, Etchells T, Malano HM (2009) Evaporation from water supply reservoirs: An assessment of uncertainty. *J Hydrol* 376:261–274
- Martínez-Alvarez V, González-Real MM, Baille A, Molina Martínez JM (2007) A novel approach for estimating the pan coefficient of irrigation water reservoirs. Application to South Eastern Spain. *Agr Water Manage* 92:29-40
- Martínez-Alvarez V, González-Real MM, Baille A, Maestre Valero JF, Gallego Elvira B (2008) Regional Assessment of Evaporation from Agricultural Irrigation Reservoirs in a Semiarid Climate. *Agr Water Manage* 95:1056-1066
- Martínez Alvarez, V., Maestre Valero, J.F., Martín Górriz, B., Gallego Elvira, B. 2010. Experimental assessment of shade-cloth covers on agricultural reservoirs for irrigation in south-eastern Spain. *Span J Agric Res* 8(S2), 122-133
- Martínez-Granados D, Maestre-Valero J.F, Calatrava J, Martínez-Alvarez V (2011) The economic impact of water evaporation losses from water reservoirs in the Segura basin, SE Spain. *Water Resour Manage* 25: 3153-3175
- MED WS&D WG (2007) Mediterranean water scarcity and drought report. Mediterranean

Maestre-Valero, J. F., D. Martínez-Granados, V. Martínez-Álvarez, and J. Calatrava. 2013. "Socio-Economic Impact of Evaporation Losses from Reservoirs Under Past, Current and Future Water Availability Scenarios in the Semi-Arid Segura Basin." *Water Resources Management* 27 (5): 1411–1426.

- water scarcity & drought working group, European Commission Technical Report 009-2007. www.emwis.net/topics/WaterScarcity.
- Menzel L, Matovelle A (2010) Current state and future development of blue water availability and blue water demand: A view at seven case studies. *J Hydrol* 384:245–263
- MIMAM (2000) Libro blanco del agua en España. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, Spain
- MIMAM (2001) Plan Hidrológico Nacional. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, Spain
- Moreno JM et al. (2005) Evaluación preliminar de los impactos en España del Cambio Climático. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, Spain
- Opricovic S (2009) A compromise solution in water resources planning. *Water Resour Manag* 23:1549–1561
- Regulwar DG, Gurav JB (2011) Irrigation Planning Under Uncertainty - A Multi Objective Fuzzy Linear Programming Approach. *Water Resour Manage* 25(5):1387-1416
- Santos FD, Forbes K, Moita R (2002) Climate Change in Portugal: Scenarios, Impacts and Adaptation Measures. SIAM Project Report, Gradiva, Lisbon, Portugal
- Segal L, Burstein L (2010) Retardation of Water Evaporation by a Protective Float. *Water Resour Manage* 24:129–137
- Schindler DW, Donahue WF (2006). An impending water crisis in Canada's western prairie provinces. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)* 103: 7210-7216
- Schröter D, Cramer W, Leemans R, Prentice IC, Araújo MB, Arnell NW, Bondeau A, Bugmann H, Carter TR, Gracia CA, de la Vega-Leinert AC, Erhard M, Ewert F, Glendining M, House JI, Kankaanpää S, Klein RTJ, Lavorell S, Linder M, Metzger MJ, Meyer J, Mitchell TD, Reginster I, Rounsevell M, Sabaté S, Sitch S, Smith B, Smith J, Smith P, Sykes MT, Thonicke K, Thuiller W, Tuck G, Zaehle S, Zierl B (2005). Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe. *Science* 310:1333–1337.
- Tsakiris G, Spiliotis M (2011). Planning Against Long Term Water Scarcity: A Fuzzy Multicriteria Approach. *Water Resour Manage* 25:1103-1129
- Trenberth KE, Dai AG, Rasmussen RM, Parsons DB (2003). The changing character of

Maestre-Valero, J. F., D. Martínez-Granados, V. Martínez-Álvarez, and J. Calatrava. 2013. "Socio-Economic Impact of Evaporation Losses from Reservoirs Under Past, Current and Future Water Availability Scenarios in the Semi-Arid Segura Basin." *Water Resources Management* 27 (5): 1411–1426.

precipitation. *Bull Am Meteorol Soc* 84:1205–1217

Wang J, Cheng G, Gao Y, Long A, Xu Z, Li X, Chen H, Barker T (2008) Optimal water resource allocation in arid and semi-arid areas. *Water Resour Manage* 22:239–258

Ward FA (1987) Economics of Water Allocation to Instream Uses in a Fully Appropriated River Basin: Evidence from a New Mexico Wild River. *Water Resour Res* 23:381-392

Young RA (2005) Determining the economic value of water: Concepts and Methods. RFF Press, Washington

Capítulo V. Publicación 3

V.1. Resumen de la publicación

Título

El papel de la desalinización para abordar la sobreexplotación de acuíferos en el sureste de España

Referencia de la publicación

Martínez-Granados, D. and Calatrava, J. (2014). "The role of desalinisation to address aquifer overdraft in SE Spain". *Journal of Environmental Management*, 144: 247-257.

Introducción

La sobreexplotación de acuíferos es uno de los principales problemas medioambientales y de gestión del agua en el sureste de España. La expansión de la agricultura intensiva de regadío durante los últimos tres decenios ha generado una gran presión sobre los recursos y reservas hídricas. Debido a la complejidad del sistema hidrológico del sureste de España, el agua subterránea es una de las principales fuentes de suministro, habiendo alcanzado la sobreexplotación proporciones alarmantes en muchos acuíferos. Como ejemplo representativo, en algunos acuíferos de la cuenca del Segura (la cuenca con más estrés hídrico de la península Ibérica) los bombeos no renovables representan entre un tercio y la mitad del uso total de agua en el regadío.

De acuerdo con la Directiva Marco del Agua (CE, 2000), las autoridades hidráulicas deben proponer un conjunto de medidas o instrumentos económicos para lograr alcanzar los objetivos medioambientales establecidos para cada zona. Aparte de la evaluación de su potencial para el logro de los objetivos medioambientales, también se debe analizar su impacto económico.

La sobreexplotación de acuíferos también pone en riesgo el cumplimiento de los objetivos medioambientales establecidos por la Confederación Hidrográfica del Segura para cumplir con la Directiva Marco del Agua (EC,2000). Se trata además de un problema de especial relevancia social y económica para la comarca del Guadalentín

debido a su gravedad y a la importancia de las aguas subterráneas para el sector agrario, uno de los más productivos y rentables de Europa.

En España, los instrumentos más utilizados para reducir las extracciones de aguas subterráneas han sido la restricción de los bombeos, mediante el establecimiento de cuotas de extracción o pagos para reducir el consumo, y la compra de derechos de agua y concesiones por parte de la Administración (Iglesias, 2002; Carmona *et al.*, 2011). La experiencia sugiere que los pagos y las cuotas para reducir el consumo son ineficaces en la práctica debido a la falta de voluntad de los políticos y de cooperación por parte de los agricultores de las zonas donde se ha implementado (Esteban y Albiac, 2011). Por otra parte, la compra pública de derechos de agua de riego ha sido utilizada en las cuencas del Guadiana y del Júcar con un éxito limitado, siendo uno de los instrumentos propuesto para su aplicación en la cuenca del Segura (CHS, 2008a). La compra pública de derechos de agua tiene la ventaja de reducir de forma permanente las extracciones y ser menos conflictiva que el establecimiento de cuotas de extracción, pero tiene como inconvenientes su coste presupuestario y un impacto significativo sobre el empleo y la economía de las zonas rurales afectadas (Carmona *et al.*, 2011).

La tarificación del agua de riego no está considerada por las agencias del agua como una herramienta para reducir las extracciones de los acuíferos en España. La literatura sugiere que no se deben tener demasiadas expectativas en las políticas de precios del agua de riego como posible solución a los problemas de asignación del agua (Garrido y Calatrava, 2010). La relativa inelasticidad de la demanda de agua para la agricultura de regadío reduce el potencial de ahorro de agua, especialmente en los sistemas agrarios intensivos, como los del sureste de España, porque los cultivos más rentables pueden soportar mayores precios del agua. Además, los sistemas agrarios intensivos utilizan tecnologías de riego eficientes para hacer frente a la ya reducida disponibilidad de agua (es decir, el agua ha sido sustituida en gran medida por capital) y por lo tanto se reduce el potencial para un mayor ahorro de agua.

La Administración Ambiental Española también ha propuesto la sustitución de los recursos subterráneos sobreexplotados por recursos procedentes de la desalinización de agua de mar. En algunas zonas, la disponibilidad de dichos recursos se está incrementando, lo que ofrece una oportunidad para abordar este problema a un coste social y económico más bajo. Sin embargo, en principio, el uso de agua marina desalinizada puede no suponer en la práctica una alternativa efectiva para reducir la sobreexplotación de los acuíferos, debido a que el coste final de los recursos provenientes de la desalinización es muy superior al de los subterráneos. Por otra parte,

también se requiere de una aplicación efectiva de los planes de gestión para asegurar que se respetan las tasas de extracción sostenibles, lo que requiere de la acción colectiva y de la cooperación de las partes interesadas (Esteban y Albiac, 2011).

El objetivo de este trabajo es analizar el impacto económico de varios instrumentos de gestión que podrían permitir eliminar la sobreexplotación de los acuíferos en la cuenca del Guadalentín, uno de los casos más graves de agotamiento de recursos hídricos subterráneos en España. Dichos instrumentos son: la compra pública de derechos de extracción de aguas subterráneas; el establecimiento de una tasa medioambiental sobre el bombeo de las aguas subterráneas; y la sustitución de las aguas subterráneas por agua desalinizada subvencionada. Su impacto se evalúa usando un modelo de programación matemática que maximiza el margen neto resultante, de la utilización de los recursos hídricos disponibles para el riego en la zona. Se analiza tanto la eficacia de cada instrumento en la consecución de dicho objetivo ambiental, así como su impacto en términos del coste presupuestario, la rentabilidad de las explotaciones, la producción y el empleo agrario.

Metodología

Instrumentos económicos analizados

De acuerdo con la discusión anterior, los instrumentos que se analizan son:

- La compra pública de derechos de agua subterránea para reducir la demanda de agua y la presión sobre los acuíferos.
- Una tasa ambiental sobre los bombeos de aguas subterráneas para reducir las extracciones, tasa que puede justificarse como una forma de internalizar el coste medioambiental que supone la sobreexplotación.
- La sustitución de los recursos hídricos subterráneos no renovables por recursos desalinizados con una subvención de su precio por parte del Estado.

La compra pública de derechos de agua de riego ha tenido poco éxito en experiencias previas en España. Sin embargo, se plantea en este trabajo la hipótesis de que, a diferencia de otras zonas de España donde se ha aplicado, la futura disponibilidad de agua marina desalinizada en la zona de estudio, puede aumentar su eficacia y la de los demás instrumentos analizados.

Tanto la compra pública de derechos como la sustitución de las aguas subterráneas por recursos desalinizados, forman parte del paquete de medidas a

establecer por la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS) para eliminar la sobreexplotación de los acuíferos (CHS, 2008a). Sin embargo, la CHS considera el intercambio de recursos subterráneos por los recursos desalinizados sin tener en cuenta las grandes diferencias en su coste para los agricultores. Es poco probable que los agricultores sustituyan el agua subterránea por un recurso más caro sin tener ningún incentivo para hacerlo. Así, se ha incorporado una subvención para los recursos procedentes de la desalinización a cambio de una reducción de las extracciones de agua subterránea. Sin embargo, como las plantas desalinizadoras ya están construidas o en construcción, los agricultores también tienen acceso al agua desalinizada no subvencionada (sin necesidad de reducir el uso de recursos subterráneos).

Por otro lado, el establecimiento de una tasa ambiental a las extracciones de agua subterránea es una medida muy impopular que puede dificultar la cooperación de los usuarios. En cualquier caso, si se aplicase, es poco probable que llegase a establecerse una tasa lo suficientemente alta como para promover un uso sostenible de las aguas subterráneas. Se considera este instrumento en este estudio debido a que genera ingresos para la Administración, en lugar de ejercer presión sobre los presupuestos públicos, aunque siempre reconociendo la dificultad de su aplicación.

Por último, también se ha considerado la prohibición de las extracciones no renovables, una opción que se ha considerado, pero nunca se ha implementado en la zona por la autoridad de la cuenca debido a su alto coste político. Evidentemente, son menos conflictivas y más eficaces otras opciones como la compra pública de derechos de agua o el suministro de recursos alternativos. Sin embargo, se ha incluido esta alternativa para medir el impacto económico de la prohibición de los bombeos, es decir, la contribución económica de las extracciones no renovables.

Cualquiera que sea el instrumento económico considerado, su puesta en práctica con éxito requiere de, entre otros requisitos, el seguimiento de las extracciones de agua subterránea y la cooperación entre todas las partes interesadas. El control de las extracciones de agua subterránea ha mejorado notablemente en la cuenca del Segura durante la última década. Actualmente, todos los derechos y concesiones de agua subterránea están registrados por la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS), y además existen medios técnicos para medir las extracciones y controlar el uso del agua. Por otra parte, el Gobierno Nacional ha incrementado la cuantía de las sanciones sobre las extracciones ilegales. La cooperación organizada entre los usuarios del agua es una cuestión más compleja. Incluso con enfoques menos problemáticos,

como la compra pública de derechos, la cooperación es un elemento clave para el éxito, como muestran las experiencias en el Guadiana.

Escenarios de disponibilidad de agua

Los instrumentos son analizados considerando dos escenarios de disponibilidad de recursos procedentes de la desalinización: el actual y el previsto a partir de 2015. Se consideran estos dos escenarios por dos razones. En primer lugar, los recursos desalinizados apenas están disponibles en la actualidad para los agricultores, ya que la mayoría de infraestructuras de transporte todavía no se han construido; en segundo lugar, se pretende evaluar cómo la disponibilidad de agua desalinizada afecta a la eficacia y el impacto de los instrumentos analizados. En el primer escenario no se considera la subvención a la desalinización porque el agua desalinizada disponible actualmente viene de una planta de propiedad privada.

Evaluación económica del impacto de cada instrumento

El impacto económico de cada instrumento se ha evaluado utilizando un modelo de programación matemática, que maximiza el margen neto agrario derivado del uso de las diferentes fuentes de abastecimiento de agua disponibles para el regadío en las diferentes áreas regables de la zona de estudio. Las variables de decisión del modelo son la cantidad de agua utilizada en cada área de cada una de las fuentes de suministro, incluyendo la desalinización con o sin subvención, y la cantidad de derechos de agua subterránea que los agricultores venden a la autoridad de la cuenca.

El modelo se ha ejecutado de forma independiente para cada uno de los instrumentos analizados y para una serie de valores del instrumento considerado en cada caso. A continuación se ha identificado el valor óptimo de cada instrumento que permite eliminar los bombeos no renovables de aguas subterráneas. A partir de los correspondientes valores óptimos de las variables de decisión, se calcularon varios indicadores económicos (valor de la producción agraria, margen neto agrario, empleo agrario y coste presupuestario soportado por la Administración) que han permitido la evaluación de cada alternativa y escenario. Dichos indicadores son calculados utilizando un conjunto de funciones que relacionan los primeros tres indicadores con la cantidad de agua utilizada en cada área. Estas funciones se han obtenido de Martínez-Granados *et al.* (2011) y Calatrava y Martínez-Granados (2012), usando un modelo de programación matemática no lineal que simula la asignación de cultivos y de agua en la agricultura de regadío de la cuenca del Segura y genera indicadores económicos del

uso del agua. Asimismo, se ha utilizado el mismo modelo para analizar el impacto de la prohibición de las extracciones no renovables.

Resultados

Una opción para eliminar la sobreexplotación de acuíferos es restringir los bombeos de agua subterránea al nivel de recarga de los acuíferos. En la situación actual, donde el agua subterránea es la principal fuente de suministro y los recursos alternativos son escasos, esta alternativa tendría un gran impacto económico sobre el sector agrario al verse reducido el uso del agua (32% de la producción agraria, 25,1% del margen neto agrario y 34,6% del empleo agrario).

Puesto que en los próximos años habrá disponibilidad de recursos procedentes de la desalinización en la zona, la prohibición de los bombeos no renovables generaría un impacto inferior que en la situación actual de disponibilidad de agua (16,5% de la producción agraria, 20,4% del margen neto y 20% del empleo agrario) ya que los agricultores podrían sustituir parcialmente los recursos subterráneos por desalinizados.

La compra pública de derechos de agua subterránea para reducir la demanda de agua es una alternativa atractiva para la Administración, ya que reduce de forma permanente las extracciones resolviendo el problema de la sobreexplotación de manera definitiva y no reduce la renta de los agricultores, ya que éstos son compensados. Sin embargo, tiene un alto coste presupuestario (48,7 M€/año) y un impacto similar, aunque menos negativo, en la economía de las zonas rurales afectadas que el escenario de prohibición de los bombeos no renovables (una reducción del 28,7% en el valor de la producción agraria y del 34,1% en el empleo agrario, con un incremento del 9,8% en el margen neto agrario).

Sin embargo, en el escenario de disponibilidad futura de recursos hídricos desalinizados, la aplicación de la alternativa de compra de derechos tendría un impacto negativo más reducido que en el escenario de disponibilidad actual (una reducción del 9,3% en el valor de la producción agraria y del 12,5% en el empleo agrario, con un incremento del 7,6% en el margen neto agrario), generando un coste presupuestario de 31,2 M€/año.

El establecimiento de una tasa ambiental a las extracciones de agua subterránea tiene una efectividad reducida, ya que la demanda de agua es muy inelástica debido a la alta rentabilidad de la zona, el alto coste de los recursos hídricos, la reducción del potencial de ahorro de agua en un sistema agrario tecnológicamente avanzado, y la falta

de recursos alternativos para sustituir el agua subterránea. Es necesario establecer una tasa muy por encima del coste actual del agua (0,709 €/m³/año) para comenzar a reducir la sobreexplotación de los acuíferos, lo que genera un impacto similar al de la restricción de las extracciones (28,7% del valor de la producción agraria, 34,8% del margen neto agrario y 34,1% del empleo agrario) reduciendo el uso del agua en la zona e incrementando el coste de los recursos hídricos subterráneos. Su única ventaja es el reducido coste presupuestario ya que genera ingresos por la recaudación de la tasa (20,7 M€/año).

Sin embargo, con la futura disponibilidad de recursos desalinizados, la efectividad de la tasa mejora. Pese a ello, para eliminar la sobreexplotación sería necesario establecer una tasa muy elevada (0,454 €/m³/año) que haga que a los agricultores les resulte más asequible utilizar agua desalinizada que pagar la tasa por extraer agua subterránea. Al sustituirse los recursos subterráneos por desalinizados, el impacto sobre la producción y el empleo agrario es similar al impacto generado con la compra pública de derechos, si bien el margen neto de los agricultores se reduce un 17,7% al utilizar un recurso más caro, generándose unos ingresos por la recaudación de la tasa de 13,3 M€/año.

En general, el impacto económico de las alternativas analizadas se reduce significativamente con el aumento de la desalinización, ya que los agricultores pueden sustituir el agua subterránea por agua desalinizada. La existencia de una fuente alternativa, aunque más cara, de suministro de agua hace que la demanda de agua sea menos inelástica y, por lo tanto, da lugar a un menor precio de compra de derechos de agua subterránea, un menor coste para la Administración, y a una tasa ambiental significativamente menor para eliminar los bombeos no renovables.

Una cuarta alternativa es la de subvencionar el precio del agua desalinizada a cambio de reducir las extracciones de agua subterránea con el fin de reducir el diferencial de precio con el agua subterránea y hacer así que a los agricultores les resulte igual o más rentable utilizar agua desalinizada que subterránea. Esta alternativa tiene un menor, aunque todavía importante, coste para la Administración (23,4 M€/año) con respecto a la compra pública de derechos de agua, pero no tiene efectos negativos sobre el sector agrario (4,9% del valor de la producción agraria, 5,3% del margen neto agrario y 4,2% el empleo agrario). En contra de lo esperado, incluso con un precio bajo del agua desalinizada, no se elimina la sobreexplotación de acuíferos, ya que los agricultores optarían por incrementar el consumo de agua con respecto a la situación

actual pagando un mayor precio por el agua desalinizada y manteniendo cierto nivel de bombeos no renovables de agua subterránea.

Conclusiones

La sobreexplotación de acuíferos es uno de los principales problemas ambientales del sureste Español y, muy especialmente en la cuenca del Guadalentín, una de las zonas agrarias más productivas de Europa. Las alternativas de gestión consideradas por la autoridad responsable del agua para hacer frente a este problema son la compra pública de derechos de agua subterránea y la sustitución de recursos subterráneos sobreexplotados por los procedentes de la desalinización de agua marina, que estarán disponibles en el futuro cercano. La elección de estos u otros instrumentos requiere de una evaluación de su eficacia e impacto económico en términos de rentabilidad de la actividad agraria, empleo agrario y coste presupuestario. En este trabajo se ha simulado el impacto económico de algunas de las alternativas que se pueden utilizar, impacto que se ha evaluado utilizando varios indicadores.

Los resultados obtenidos muestran cómo, en la situación actual de disponibilidad de recursos hídricos, todas las alternativas tienen impactos económicos significativos sobre el sector agrario. La disponibilidad de recursos desalinizados a medio plazo cambia por completo la eficacia y el impacto de las alternativas de gestión propuestas. Los resultados sugieren que la demanda de estos recursos es importante, ya que la mitad de los recursos disponibles para el año 2015 y posteriores se utilizarían a pesar de su precio relativamente alto para los agricultores. Sin embargo, este incremento en el uso de la desalinización no reduce las extracciones de aguas subterráneas debido a la severa escasez hídrica en el área de estudio. Tampoco sería usada toda el agua desalinizada disponible, ya que es más cara para los agricultores que otras fuentes de abastecimiento. Este es un resultado importante, ya que contradice a aquellos que dicen que no hay demanda de agua desalinizada debido a su alto precio para los agricultores, pero también a los que defienden que, poniendo el agua desalinizada a disposición de los agricultores, se reducirían las extracciones de recursos subterráneos sin dejar de satisfacer la demanda de agua de riego.

La mayor disponibilidad en el futuro, aunque a un mayor precio, de recursos procedentes de la desalinización reduciría el impacto económico adverso sobre el sector agrario de los instrumentos analizados, aunque no lo eliminaría totalmente. Es más, la demanda de agua es tan elevada en la zona que incluso subvencionando fuertemente el agua marina desalinizada a cambio de reducir el uso de agua subterránea no se

eliminaría la sobreexplotación. Elegir entre las diferentes medidas analizadas dependerá por tanto de la importancia relativa que se dé a su impacto sobre el sector agrario frente a su coste presupuestario.

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que el éxito de cualquier intervención dependerá de la cooperación entre los usuarios. En este sentido, es probable que la compra pública de derechos de agua sea mejor recibida por los agricultores que la prohibición de extracciones o la tasa ambiental. Es poco probable que una tasa mayor que unos pocos céntimos de euro pudiera establecerse en España, o que los bombeos no renovables se restringieran sin ningún tipo de compensación, como han mostrado las experiencias en otras cuencas españolas (Esteban y Albiac, 2011; Garrido *et al.*, 2013). Estas dos alternativas son por lo tanto altamente inviables desde el punto de vista político. La solución podría ser una combinación de instrumentos (incluyendo cierto grado de subvención a la desalinización) que permitiera compartir el coste de la recuperación de los acuíferos entre los agricultores y la Administración, generando el impacto más bajo posible sobre el sector agrario.

V.2. Copia de la publicación

Martínez-Granados, D., Calatrava, J. (2014). "The role of desalination to address aquifer overdraft in SE Spain". *Journal of Environmental Management* 144: 247-257.

The role of desalination to address aquifer overdraft in SE Spain

David Martínez-Granados ^a, Javier Calatrava ^{b*}

^a Área de Economía, Sociología y Política Agraria, ETSIA, Universidad Politécnica de Cartagena. Paseo Alfonso XIII N° 48, 30203 Cartagena, Spain. E-mail: david.martinez@upct.es. Tel: +34968327069.

^b Área de Economía, Sociología y Política Agraria, ETSIA, Universidad Politécnica de Cartagena. Paseo Alfonso XIII N° 48, 30203 Cartagena, Spain. E-mail: j.calatrava@upct.es. Tel.: +34968325906.

* Corresponding author.

Abstract: Aquifer overdraft is a major environmental and water management problem in Southeast Spain. In some areas, availability of desalinated seawater resources is being expanding, which provides an opportunity to address this problem at a lower social and economic cost. We analyse the economic impact of using several instruments to address the problem of non-renewable groundwater pumping in the aquifers of the Guadalentín basin: an environmental tax on groundwater use, the buyback of groundwater rights and the subsidization of desalinated resources. Their impact is assessed using a mathematical programming model that maximises the farm net margin resulting from the use of the available water resources for irrigation in the area. Our results show that, in the current situation of water availability, all the alternatives have significant economic impacts. Moreover, the first two alternatives would be unfeasible from a political point of view. The existence of abundant, though expensive, desalinated water resources in the foreseen future would reduce, but not eliminate, the negative economic impact of such instruments. Furthermore, water demand is so high in this area that even strongly subsidising desalinated water in exchange for reducing the use of groundwater would not allow to eliminate aquifer overdraft.

Keywords: groundwater; irrigation; desalinated water; water economics; economic instruments; water demand; mathematical programming.

Martínez-Granados, D., Calatrava, J. (2014). "The role of desalination to address aquifer overdraft in SE Spain". *Journal of Environmental Management* 144: 247-257.

1 Introduction

Aquifer overdraft is one of the major environmental and water management problems in Southeast Spain. The expansion of intensive horticulture over the last three decades has created huge pressures on all water resources. Because of the complex hydrological characteristics of Southeast Spain, groundwater is a major source of water and over-exploitation has reached alarming proportions in many aquifers. As a representative example, in some aquifers of the Segura basin (the most-water stressed basin in Spain) non-renewable pumping accounts for one-third to one-half of total water use for irrigation.

In the Segura basin, the most severe pressures over water resources that make it difficult to accomplish the environmental objectives established by the basin authority to comply with the European Water Framework Directive (WFD) (EC, 2000) are reduced river flows, non-point source pollution and unsustainable groundwater pumping (CHS, 2008a). Among these, the last one is of special social and economic importance because of its severity and the relevance of groundwater for the agricultural sector, one of the most productive and profitable in Europe.

According to the WFD (EC, 2000), water agencies must propose a set of measures or economic instruments to achieve the environmental objectives established for each area. Apart from assessing their potential for achieving the environmental objectives, water agencies must also analyse their economic impact.

In Spain, the most commonly used instruments to reduce groundwater extractions are based, rather than on water pricing mechanisms, on restricting water pumping by establishing extraction quotas or payments to reduce consumption, and on purchases or buybacks of water rights and concessions (Iglesias, 2002; Carmona *et al.*, 2011). Payments and quotas to reduce consumption have proven to be ineffective in practice because of the reduced politicians' willingness and farmers' cooperation in those areas where it has been implemented (Esteban and Albiac, 2011). On the other hand, the buyback of water rights has been used in the Guadiana and Júcar basins with some

Martínez-Granados, D., Calatrava, J. (2014). "The role of desalination to address aquifer overdraft in SE Spain". *Journal of Environmental Management* 144: 247-257.

limited success,¹ and it is one of the instruments proposed by the Segura River Basin Authority (Confederación Hidrográfica del Segura, acronym CHS) (CHS, 2008a). Purchasing water rights has the advantage of permanently reducing extractions and is less conflictive than consumption quotas, but it has both a high public budgetary cost and significant impacts on the economy of the affected rural areas (Carmona *et al.*, 2011).

Water pricing is not considered as a groundwater demand management tool by Spanish water administrations. In most countries, farmers using groundwater usually pay for the investment, operation and maintenance costs of water pumping but they do not pay any tariff (Berbel *et al.*, 2007). Thus the financial costs of abstraction are fully recovered, but social and environmental costs are usually not included, causing a non-sustainable use of groundwater resources (Garrido and Calatrava, 2010). Very few agencies have resorted to use tariffs or taxes on extractions to reduce use when groundwater has been used unsustainably, and most have opted to establish quotas, caps or extraction zones.²

However, the literature suggests that one should lower the expectations from irrigation pricing policies as the solution to water allocation problems (Garrido and Calatrava, 2010). Most studies on irrigation water pricing conclude that water demand is very inelastic in the short term, at least for low water tariffs or reduced water availability (Scheierling *et al.*, 2006; Berbel *et al.*, 2007; Wheeler *et al.*, 2008), and that increasing irrigation water prices would have a significant impact not only on farmers, but also on the whole agricultural sector and the rural economy (Giannocaro *et al.*, 2010).

The relative inelasticity of agricultural water demand reduces the potential for water saving, especially on intensive agricultural systems such as the ones in southeast Spain, because more profitable crops can stand greater water prices. Moreover, intensive irrigated agricultural systems use efficient irrigation technologies to face the already reduced water availability (i.e., water has been partly substituted by capital) and thus the potential for further water saving is reduced.

¹ For example, in the case of the Upper Guadiana purchase of water rights (the largest experience to date in Spain), the purchase was successful in acquiring groundwater rights but not in reducing abstractions, as purchased resources were mostly reallocated to other users (Garrido *et al.*, 2013).

² Exceptions to this rule are countries such as France or the Netherlands. The 2006 reform of the French Water Act established a tax on water abstractions from both surface and groundwater sources (Graveline, 2013), whereas the Netherlands established in 1994 an environmental tax on groundwater pumping, which was revoked in December 2011 for being inefficient (Schuerhoff *et al.*, 2013).

Martínez-Granados, D., Calatrava, J. (2014). "The role of desalination to address aquifer overdraft in SE Spain". *Journal of Environmental Management* 144: 247-257.

The Spanish environmental administration has also proposed the substitution of over-exploited groundwater resources in southeast Spain by desalinated seawater resources from several plants that have been, and in some cases still are, under construction since the mid 2000s along the Spanish Mediterranean coast (Downward and Taylor, 2007; CHS, 2008a). Albiac *et al.* (2006) show that developing desalinated resources have lower private and social costs than transferring water from the Northern Ebro basin to supply water for irrigation in the Mediterranean Spanish basins. Currently the supply of desalinated water is reduced and mostly serves urban customers and, exceptionally, some irrigated areas but its availability will increase in the foreseen future, as several desalination plants and many associated transportation infrastructures are still being built. However, in principle, desalinated water may not be effective to reduce groundwater extractions, as its price is greater than the cost of groundwater pumping. Moreover, it also requires an effective implementation of management plans to secure the sustainable extraction rates are respected, what requires the cooperation and collective action of stakeholders (Esteban and Albiac, 2011).

In this sense, our objective is to analyse the economic impact of several economic instruments that could serve to eliminate aquifer overdraft in the Guadalentín River Valley, one of the most severe cases of groundwater depletion in Spain: the public purchase of groundwater pumping rights, the establishment of an environmental tax on groundwater pumping and the substitution of groundwater by subsidised desalinated resources. We analyse both the effectiveness of each instrument in achieving such objective and its impact in terms of budgetary cost of the government, farm profitability, agricultural production and employment.

Martínez-Granados, D., Calatrava, J. (2014). "The role of desalination to address aquifer overdraft in SE Spain". *Journal of Environmental Management* 144: 247-257.

2 The Guadalentín basin

The Guadalentín basin belongs to the semi-arid Segura basin that is located in the southeast of Spain (Figure 1). It covers an area of 3,300 km² that is divided into the

Spanish regions of Murcia and Andalusia. The Murcia sector, totalling about 2,200 km², is home to most of the basin's population and irrigated agriculture (Calatrava *et al.*, 2011). The Guadalentín is one of the most productive agricultural areas of Spain because of its climate, which ranges between the semi-arid and the Mediterranean, making it an ideal setting for out-of-season horticulture. On the other hand, rainfall is scarce. Although average annual precipitation ranges from 250 to 500 mm, most of the territory receives less than 350 mm.

[Figure 1]

The Guadalentín basin is a heterogeneous agricultural landscape marked by a strong duality between rain fed agriculture in the mountainous areas and high plains and a highly profitable intensive horticulture in the irrigated plains of the basin (Calatrava *et al.*, 2011). The average value of agricultural production in the area is approximately 21,000 euros per hectare (Martínez-Granados *et al.*, 2011), while rain fed crop yields are among the lowest in Spain. The major irrigated crops are artichoke, broccoli, lettuce, tomato, watermelon, citrus and table grape.

Structural water scarcity is especially severe in the Segura. Although this basin usually receives external resources from central Spain through the Tajo-Segura Aqueduct (TSA), the huge expansion of the irrigated area over the last three decades has caused a chronic structural water deficit that positions it as one of the most water stressed basins in the Mediterranean (Maestre-Valero *et al.*, 2013). For information on the physical environment, the agricultural sector and the water budget in the Segura basin, see Martínez-Granados *et al.* (2011).

Martínez-Granados, D., Calatrava, J. (2014). "The role of desalination to address aquifer overdraft in SE Spain". *Journal of Environmental Management* 144: 247-257.

3 Water budget and aquifer overdraft in the Guadalentín

In this study we consider seven irrigated areas (Agricultural Demand Units in the Segura River Basin Authority's terminology) that are shown in Figure 2. Their irrigated areas and water demands are shown in Table 1. Six of these irrigated areas belong to the Guadalentín basin, whereas area number 68 is located outside the basin. However, it is included in our study because its groundwater resources come from an aquifer that is shared with the Guadalentín. According to the Segura River Basin Authority (CHS, 2008b) agricultural water demand in these irrigated areas accounts for 284.2 Mm³/year (Table 1).

[Figure 2 and Table 1]

Theoretical water availability is 206.9 Mm³/year, including several sources of water supply (Table 2). Groundwater supplies approximately 50.9% of the area's water resources, whereas surface water accounts for 10.5% of these. The Tajo-Segura Aqueduct (TSA), a 300 km long channel connecting with the Tajo basin in central Spain, supplies 31.4% of the area's resources. Water reuse (3.4%) comes from the purification of urban wastewater. And finally, a desalination plant supplies up to 8 Mm³/year to one of the irrigated areas (3.9% of water resources).

This unbalance between resources and demands is caused by the huge increase in irrigation schemes developed over the last few decades in the whole Segura basin, based on very optimistic expectations about the yearly amount of water that would be transferred from the Tajo basin³ (Martínez-Granados *et al.*, 2011).

³ Water reuse potential is almost fully developed in the Segura basin, as more than 97% of urban wastewater goes through a tertiary treatment and farmers use most of it. In the area of study, several irrigation communities have been allocated public concessions for using all water resources from urban wastewater treatment plants.

³ Initially, when the Tajo-Segura aqueduct was designed, an annual water transfer from the Tajo basin of 1,000 Mm³ was planned, although once it was built only 600 Mm³ (400 Mm³ for irrigation) were finally approved to be transferred annually (Calatrava and Garrido, 2010). In practice, much less water has been transferred (239 Mm³/year on average during the last 15 years). In the Guadalentín, average water availability from the Tajo-Segura Transfer accounts for 38.9 Mm³/year, whereas the volume established in the concession is 64.9 Mm³/year (Table 2). Since November 2013 a legislative initiative guarantees the continuity of the Tajo Segura Transfer.

Martínez-Granados, D., Calatrava, J. (2014). "The role of desalination to address aquifer overdraft in SE Spain". *Journal of Environmental Management* 144: 247-257.

The data on water resources availability shown in Table 2 is merely theoretical, based on existing rights and concessions, and serves only for planning purposes. They are based on the average annual renewable water resources inflows in the Segura basin for 1940-1996 (823 Mm³/year according to CHS, 2006) and assume that the TSA always transfers its maximum legal water allotment (400 Mm³/year). However, this optimistic water availability scenario has never occurred.

In practice, effectively available resources are smaller, as shown in Table 3. First, available renewable water resources for irrigation are approximately an 80% of those in Table 2, in accordance with the average water inflows for the 1980-2005 period estimated in the Segura Basin Drought Contingency Plan (CHS, 2006); Secondly, the Tajo-Segura Aqueduct (TSA) only supplies on average a 60% of its maximum annual transferable water allotment for irrigation; finally, real water availability from desalination and treated wastewater sources corresponds with the theoretical availability in Table 2. Treated wastewater comes from domestic users, which present stable annual levels of water consumption.

[Table 3]

Available resources in Table 3 only cover 60% of the agricultural water demand in the area of study, the latter exceeding the former by 114.9 Mm³/year (Table 1). Such deficit is partly covered with a deficit application of water to crops, which are in many cases subject to water stress conditions, estimated at approximately 77 Mm³/year, and partly by a reduction in the cultivated area. However, if we were to consider only the availability of renewable resources, such water deficit is in fact greater: 68.7 Mm³/year out of the 169.3 Mm³/year of available resources correspond to non-renewable groundwater pumping. Therefore, if only the 100.6 Mm³/year of available renewable resources were used, they would cover only 35% of the theoretical agricultural water demand and 49% of the agricultural water demand once the deficit water application to crops has been accounted for.

[Figure 3]

Martínez-Granados, D., Calatrava, J. (2014). "The role of desalination to address aquifer overdraft in SE Spain". *Journal of Environmental Management* 144: 247-257.

The massive use of groundwater resources during the last decades has caused the depletion of six aquifers in the Guadalentín area (Figure 3), some of them quite severely⁴ (CHS, 2008a). To address this problem, the river basin authority has proposed several measures that aim at limiting groundwater pumping (CHS, 2008a). On one hand, they have proposed a management plan for the aquifers to control pumping over the quotas established in rights and concessions and to reduce extraction quotas. This plan is still under discussion because of its great economic impact and has not been approved yet. On the other hand, the basin authority proposes measures such as the compulsory purchase of groundwater rights or the substitution of groundwater by desalinated resources from the Águilas and Valdelentisco desalination plants. These plants, once functioning at full capacity and connected with the end users, can supply up to 130 Mm³/year for both domestic and agricultural users in several areas of the Segura basin including the Guadalentín. The total availability of desalinated water for agricultural users located in the area of study is estimated to be approximately 80 Mm³/year from 2015 onwards. Finally, Table 4 shows the unitary cost of water from the different sources of supply and in each of the irrigated areas of the Guadalentín.

[Table 4]

4 Methodology

4.1 Economic instruments considered

In accordance with the previous discussion, the instruments that we analyse are:

- The purchase of groundwater rights and the buyback of public groundwater concessions to reduce water demand and pressure over the aquifers.
- An environmental tax on groundwater to reduce extractions that can be justified as a way of internalizing the environmental cost of over pumping.

⁴ Based on average aquifers' depth and piezometric levels (CHS, 2008a), we estimate that accumulated non-renewable extractions during the last 30 years account for approximately 60% of the aquifers' capacity. In addition, as piezometric levels have substantially decreased, pumping costs have notably increased during the last decades.

Martínez-Granados, D., Calatrava, J. (2014). "The role of desalination to address aquifer overdraft in SE Spain". *Journal of Environmental Management* 144: 247-257.

- Substitution of non-renewable groundwater resources by desalinated water with a subsidised price.

As discussed previously, the purchase of water rights permanently reduces groundwater extractions and is less conflictive than other command and control policies. However, its public cost and its impact on the rural economy can be considerable in intensive agricultural systems. The previous experiences in Spain have had a limited success: either the purchase price was not attractive for farmers or the purchased rights were reallocated to other users and extractions were barely reduced (Garrido et al., 2013). In other areas of Spain where it has been applied there are no alternative resources to groundwater, what creates a large incentive to continue over-pumping. In the case of the Guadalentín, there exist other alternative resources, but water scarcity and the profitability of horticulture still put pressure on groundwater. We analyse if the future availability of desalinated water is likely to add effectiveness to these and the other instruments.

As the purchase of rights, the substitution of groundwater by desalinated seawater is also considered by the CHS in the set of measures to eliminate aquifer depletion (CHS, 2008a). However, the CHS only considers the exchange of groundwater resources by desalinated resources without taking into account the large differences in their cost for farmers. It is very unlikely that farmers will substitute groundwater with a more expensive resource without having any incentive to do so. We have thus incorporated a subsidy for desalination subject to a reduction in groundwater extractions. However, as desalination plants are already built or being built, farmers will also have access to non-subsidised desalinated water.

On the other hand, the increase in water tariffs is only considered by the CHS for surface resources and with the sole objective of increasing the level of cost recovery, not as a demand management tool. An environmental tax on water extractions is a very unpopular measure, what makes the cooperation of water users difficult to get. In any case, should it be applied, it is very unlikely that a high tax that promotes a sustainable groundwater use could be set. We consider it because it provides revenue for the government, instead of putting pressure on public budgets, although we recognise the difficulty of its implementation.

Martínez-Granados, D., Calatrava, J. (2014). "The role of desalination to address aquifer overdraft in SE Spain". *Journal of Environmental Management* 144: 247-257.

Finally, we have also considered the prohibition of non-renewable extractions, an option that has been considered but never implemented by the water authority in the area because of its high political cost. It is obviously less conflictive and more effective to purchase water rights or provide alternative resources. However, we have included this, not because we consider it as an effective policy option, but to measure the economic impact of forbidding overdraft pumping, that is, the economic contribution on non-renewable extractions.

Whatever the economic instrument considered, its successful implementation requires, among other prerequisites, the monitoring of groundwater extractions and the cooperation from water users. Monitoring of groundwater extractions has been greatly improved in the Segura basin during the last decade. Currently all groundwater rights and concessions in the area are registered by the Segura River Basin Authority (CHS) and technical means exist to measure extractions and control water use. Moreover, the National Government has increased sanctions for illegal pumping. In addition, the number of right and concession holders in the area of study is relatively small and some of them are large users,⁵ what eases the control of water use. The organized cooperation of water users is a more complex issue. Even with less troublesome approaches, such as the public purchases of rights, cooperation is a key element for success, as the Guadiana experiences show.

4.2 Water availability scenarios

The instruments are analysed under two water availability scenarios considering the current availability of desalinated resources, and the one expected for 2015 onwards, respectively. These two scenarios are considered for two major reasons. First, desalinated resources are barely available to farmers, as most transportation infrastructures have not been built yet; Secondly, we are interested in analysing how the availability of desalinated water affects the effectiveness and impact of the analysed instruments. The instruments and scenarios analysed are summarised in Table 5. In the

⁵ According to data obtained from the Segura River Basin Authority, there are 522 holders of groundwater rights or concessions in the area of study, including irrigation communities, which distribute a maximum of 64.3 Mm³/year of water from their communal wells. Large horticultural enterprises have groundwater rights for 16.8 Mm³/year and individual right holders use a maximum of 24.2 Mm³/year.

Martínez-Granados, D., Calatrava, J. (2014). "The role of desalination to address aquifer overdraft in SE Spain". *Journal of Environmental Management* 144: 247-257.

first scenario we do not consider the subsidisation of desalination because currently available desalinated water comes from a privately owned plant.

[Table 5]

4.3 Economic assessment of the impact of each instrument

4.3.1 General specification of the models used

The economic impact of each instrument is assessed using a mathematical programming model that maximises agricultural net margin derived from using the different sources of water supply available for irrigation in each area.

The objective function is:

$$\text{Max } \sum_z [MN_z(wu_z) - \sum_o (pw_{zo} \times wu_{zo}) - ta \times wu_{z,subt} + pc \times wv_{z,subt} + sd \times wu_{z,desal\ subv}] \quad [1]$$

Subject to the following constrains:

$$wu_z = \sum_o wu_{zo} \quad \forall z \quad [2]$$

$$wu_{zo} \leq dot_{zo} \quad \forall z, o = \text{surface, Tajo-Segura Transfer, treated wastewater} \quad [3]$$

$$wu_{z,subt} + wv_{z,subt} + wu_{z,desal\ subv} \leq dot_{z,subt} \quad \forall z \quad [4]$$

$$wu_{z,desal} + wu_{z,desal\ subv} \leq dot_{z,desal} \quad \forall z \quad [5]$$

$$wu_{zo} \geq 0 \quad \forall z, o \quad [6]$$

$$wv_{z,subt} \geq 0 \quad \forall z \quad [7]$$

Where: z are the irrigated areas (CHS codes 60, 61, 63, 64, 65, 66 y 68); o denotes each source of water supply (surface water, Tajo-Segura transfer, treated wastewater, groundwater, desalinated water, subsidised desalinated water); wu_z is the

Martínez-Granados, D., Calatrava, J. (2014). "The role of desalination to address aquifer overdraft in SE Spain". *Journal of Environmental Management* 144: 247-257.

amount of water used in the irrigated area z from all the sources of water supply o (measured in hm^3/year); $MN_z(wu_z)$ is a function that relates the amount of water used in the irrigated area z with the farm net margin generated in that area (measured in euros); pw_{zo} is the average cost of water from each source of supply o in each irrigated area z (measured in euros/ m^3/year); wu_{zo} is the amount of water used in the irrigated area z from the source of water supply o (measured in hm^3/year); ta is the environmental tax on groundwater extraction (measured in euros/ m^3/year); pc is the purchase price for groundwater rights and concessions (measured in euros/ m^3/year); $wv_{z,subt}$ is the amount of groundwater rights purchased by the CHS in each area z (measured in hm^3/year); sd groundwater rights and concessions (measured in euros/ m^3/year); $wv_{z,subt}$ is the amount of groundwater rights purchased by the CHS in each area z (measured in hm^3/year); sd is the subsidy to desalinated water (measured in euros/ m^3/year); $wu_{z,desal\ subv}$ is the amount of water whose price is subsidised in exchange for reducing groundwater pumping in each area z (measured in hm^3/year); dot_{zo} is the amount of irrigation water available from each source of water supply o in each area z .

The model's decision variables are the amount of water used in each area from each source of water supply o (wu_{zo} and thus wu_z) and the amount of groundwater rights that farmers sell to the basin authority (wv_{subt}).

The objective function [1] maximizes the farm net margin derived from using the different sources of water supply available for irrigation for all the irrigated areas in the area of study. The first set of constrains [2] calculates the total amount of irrigation water used in each area (wu_z) as the sum of the amount of water used from each source of supply in each area (wu_{zo}). The second set of constrains [3] restricts the amount of water that can be used from surface, transferred and wastewater in each area to their availability. The third set of constrains [4] relates to the availability of groundwater and forces that sold groundwater rights are not used and that subsidised desalinated water replaces groundwater pumping. Farmers can use desalinated water without subsidy but if they want its price to be subsidised they must reduce groundwater pumping in exchange. The fourth set of constrains [5] restricts the amount of desalinated water (with or without subsidy) to the availability of desalinated water in each area. Finally, expressions [6] and [7] are two sets of non-negativity constrains for the decision variables water used (wu_{zo}) and selling of groundwater rights by farmers (wv_{subt}) respectively.

Martínez-Granados, D., Calatrava, J. (2014). "The role of desalination to address aquifer overdraft in SE Spain". *Journal of Environmental Management* 144: 247-257.

The model is run independently for each instrument (*ta*, *pc* and *sd*) by parameterizing it and identifying the optimal value of each instrument that allows eliminating non-renewable groundwater pumping. From the optimal values of the decision variables we calculate several economic indicators (value of agricultural production, farm net margin, agricultural employment, budgetary cost for the administration) that allow assessing each alternative and scenario. They are calculated using a set of functions that relate the first three indicators with the amount of water used in each area. These functions have been obtained from Martínez-Granados *et al.* (2011) and Calatrava and Martínez-Granados (2012).⁶ The economic indicators are calculated as follows:

Value of agricultural production:

$$\sum_z PFA_z(wu_z^*) \quad [8]$$

Net margin:

$$\sum_z [MN_z(wu_z^*) - \sum_o (pw_{zo} \times wu_{zo}^*) - ta \times wu_{z,subt}^* + pc \times wv_{z,subt}^* + sd \times wu_{z,desal\ subv}^*] \quad [9]$$

Agricultural employment:

$$\sum_z MO_z(wu_z^*) \quad [10]$$

Budgetary cost for the basin authority:

$$\sum_z [pc \times wv_{z,subt}^* + sd \times wu_{z,desal\ subv}^* - ta \times wu_{z,subt}^*] \quad [11]$$

Where: $PFA_z(wu_z)$ is a function that relates the amount of water used in each irrigated area z with the value of agricultural production in that area (euros); $MN_z(wu_z)$ is a function that relates the amount of water used in each irrigated area z with the total farm net margin generated in that area (euros); $MO_z(wu_z)$ is a function that relates the

⁶ The functions come from a non-linear mathematical programming model that simulates crop and water allocation in the irrigated agriculture of the Segura basin and generates economic indicators of water use. For detailed descriptions of the model used, including its mathematical structure, its technical and economic coefficients and its calibration process, see Martínez-Granados *et al.* (2011) and Calatrava and Martínez-Granados (2012).

Martínez-Granados, D., Calatrava, J. (2014). "The role of desalination to address aquifer overdraft in SE Spain". *Journal of Environmental Management* 144: 247-257.

amount of water used in each irrigated area z with the resulting agricultural employment created in that area (euros).

4.3.2 Assessment of the impact of the prohibition of non-renewable groundwater pumping

The specification of the model that assesses the impact of the prohibition of non-renewable groundwater pumping is obtained from the general model (expressions [1] to [7]) by equalling parameters ta , pc and sd to zero, eliminating variables $wv_{z,subt}$ and $wu_{z,desal,subv}$ and substituting constrain [4] for constrain [12] as follows:

$$wu_{z,subt} \leq dot_{z,subt} - nonrenew_z \quad \forall z \quad [12]$$

Where $nonrenew_z$ is the amount of non-renewable groundwater pumping in each area z (measured in $Mm^3/year$). This set of constrains [31] restricts groundwater use to its renewable fraction in each area. The model's decision variables are the amount of water used in each area from each source of water supply o (wu_{zo} and thus wu_z). From the optimal values of wu_{zo} we calculate the economic indicators using expressions [8] to [11] for ta , pc and sd equal to zero.

4.3.3 Assessment of the impact of the public purchase of groundwater right

The specification of the model that assesses the impact of the purchase of groundwater rights is obtained from the general model (expressions [1] to [7]) by equalling parameters ta and sd to zero and eliminating variable $wu_{z,desal,subv}$. The model's decision variables are the amount of water used in each area from each source of water o (wu_{zo} and thus wu_z) and the amount of groundwater rights that farmers sell to the basin authority (wv_{subt}). We run this model by parameterizing pc and identifying the optimal value of pc that allows us to eliminate non-renewable groundwater pumping. From the optimal values of pc , wu_{zo} and wv_{subt} we calculate the economic indicators using expressions [8] to [11] for ta and sd equal to zero.

Martínez-Granados, D., Calatrava, J. (2014). "The role of desalination to address aquifer overdraft in SE Spain". *Journal of Environmental Management* 144: 247-257.

4.3.4 Assessment of the impact of a volumetric environmental tax

The specification of the model that assesses the impact of an environmental tax is obtained from the general model (expressions [1] to [7]) by equalling parameters pc and sd to zero and eliminating variables $wv_{z,subt}$ and $wu_{z,desal\ subv}$. The model's decision variables are the amount of water used in each area from each source of water o (wu_{zo} and thus wu_z). We run this model by parameterizing the tax ta and identifying the optimal value of ta that allows us to eliminate non-renewable groundwater pumping. From the optimal values of ta and wu_{zo} we calculate the economic indicators using expressions [8] to [11] for pc and sd equal to zero.

4.3.5 Assessment of the impact of a subsidy to desalinated water

The specification of the model that assesses the impact of the subsidisation of desalinated water is obtained from the general model (expressions [1] to [7]) by equalling parameters ta and pc to zero and eliminating variable $wv_{z,subt}$. The model's decision variables are the amount of water used in each area from each source of water o (wu_{zo} and thus wu_z) and the amount of desalinated water that is subsidised in exchange for reducing groundwater pumping ($wu_{z,desal\ subv}$). We run this model by parameterizing sd and identifying the optimal value of sd that allows us to eliminate non-renewable groundwater pumping. From the optimal values of sd , wu_{zo} and $wu_{z,desal\ subv}$ we calculate the economic indicators using expressions [8] to [11] for ta and pc equal to zero.

5 Results

5.1 Scenario of current availability of desalinated water

Table 6 summarises the value of the economic indicators for the different management alternatives considered in the scenario of current water availability shown in Table 3. In such scenario, all available water resources are used, as their availability is less than the existing demand. The second column in Table 6 corresponds to the "**No intervention**" scenario in which no action is taken to address the aquifer overdraft problem, i.e. the current situation. Currently, the market value of agricultural production

Martínez-Granados, D., Calatrava, J. (2014). "The role of desalination to address aquifer overdraft in SE Spain". *Journal of Environmental Management* 144: 247-257.

in the area of study is 448 million euros per year with an annual private profitability measured in terms of net margin of 155.6 million euros. Consequently, the average value of irrigation water is 0.92 €/m³/year, among the highest ones in Europe. Agricultural employment generated amounts to 12,189 workers each year.

[Table 6]

In the current situation, where groundwater is a major source of water supply and new alternative resources are scarce, **restricting groundwater pumping to the level of aquifers' recharge** would have a significant impact on the area of study. The prohibition of non-renewable groundwater extraction reduces the market value of agricultural production by 143.2 million euros/year (a 32% reduction), as shown in the third column of Table 6. Its impact in terms of foregone net margin is 39.1 million euros/year (a 25% reduction), whereas the demand for agricultural labour falls by a 34.6% (4,215 workers/year).

Eliminating non-renewable extractions by **purchasing groundwater rights** requires a purchase price of 0,71 euros/m³/year (measured in terms of the annual equivalent cost of the purchase price). As this price is increased more farmers will be interested in selling their rights. A high price is required to purchase enough rights to solve the depletion problem because of the high profitability of water in the area. This instrument has significant economic impacts and a high cost for the public budget, as shown in the fourth column of Table 6.

The purchase of groundwater rights has a lower economic impact than the prohibition of non-renewable groundwater pumping. First, the reduction in the value of agricultural production is smaller (128.4 instead of 143.2 million euros/year). The reason is that the level of non-renewable groundwater pumping is defined for each irrigated area and thus its prohibition would affect farmers differently depending on the area where they are located and regardless of the profitability of their farming activity. On the contrary, purchasing groundwater rights would reduce pumping by those less-profitable farmers that would be the first ones to sell-out their rights to the government, resulting in a lower reduction in the value of agricultural production. Second, the impact on agricultural employment is similar to the case of the prohibition.

Martínez-Granados, D., Calatrava, J. (2014). "The role of desalination to address aquifer overdraft in SE Spain". *Journal of Environmental Management* 144: 247-257.

However, the major difference with the prohibition alternative is that the purchase compensates farmers for the loss of their rights and thus increases farm net margin, in this case, by 15.3 million euros/year (a 9.8% increase). On the other hand, the budgetary cost is 48.7 million euros per year. If we capitalise this annual equivalent cost at the current interest rate of 4%, the total cost of acquiring the water rights is 1,217.5 million euros.

The impact of an **environmental tax on groundwater extraction** is equivalent to that of the purchase of water rights in terms of reduced water use, value of agricultural production and agricultural employment (fifth column of Table 6). Eliminating non-renewable extractions therefore requires a tax of at least 0,71 euros/m³/year, which is very high and thus unfeasible from the political point of view. Its major impact would fall on the farmer's net margin that is reduced by 54.2 million euros/year (a 34.8% reduction) both as a consequence of reduced water use and increased cost of groundwater resources. The tax revenue for basin authority would amount to 20.7 million euros/year.

5.2 Scenario of future availability of desalinated water (2015 onwards)

The future ample availability of desalinated resources completely changes the effectiveness and impact of the management alternatives. First of all, results for the "**no intervention**" scenario show that, because of the high demand for irrigation water in the area of study, and despite their comparatively high price (Table 5), a significant proportion of the new desalinated resources are used if they are available for irrigation, specifically, 31.1 out of 72 Mm³, as shown in the second column in Table 7. However, this increased use of desalinated water does not result in a reduction of the level of groundwater extraction because of the severe existing water scarcity. Neither does it result in all the desalinated water available being used, as it is far more expensive for farmers than other resources. With respect to the current situation (second column in Table 6), the increased availability of desalinated resources planned from 2015 onwards (second column in Table 7) increases the value of agricultural production by 84.5 million euros/year (18.9%), farm net margin by 20.6 million euros/year (13.2%) and agricultural employment by 2,862 workers/year (23.5%).

The future increase in available desalinated water has important implications for the effectiveness and impact of the analysed management alternatives. For example,

Martínez-Granados, D., Calatrava, J. (2014). "The role of desalination to address aquifer overdraft in SE Spain". *Journal of Environmental Management* 144: 247-257.

restricting groundwater pumping to the level of aquifers' recharge has a lower impact than in the current water availability scenario, as farmers can substitute groundwater for desalinated resources. As shown in the third column of Table 7, this alternative reduces agricultural production by 87.7 million euros/year (a 16.5% reduction), farm net margin by 36 million euros/year (a 20,4% reduction) and agricultural labour by 3,013 workers/year (a 20% reduction). Moreover, if we compare this alternative with the current situation (second column in Table 6), we can see that the levels of agricultural production and agricultural employment are similar (Figure 4). Thus, the availability of a large amount of desalinated water mostly offsets the negative impact that restricting non-renewable pumping has for the agricultural sector, but at the cost of reducing farm profitability by a 10% because of the increased water cost.

Similarly, the **purchase of groundwater rights** has a lower impact, both in absolute and relative terms, than in the current water availability scenario as farmers can substitute the sold groundwater rights for desalinated resources (Fourth column of Table 7). The existence of an alternative source of water supply results in a lower purchase price being required to buyback enough water rights to eliminate non-renewable pumping (0.454 euros/m³/year, measured as an annual equivalent cost, compared to 0.709 euros/m³/year in the previous case). In this second scenario, this alternative only reduces agricultural production by 49.5 million euros/year, and agricultural labour by 1,886 workers/year (compared to 128.4 and 4,791 respectively in the current availability scenario). On the other hand, the purchase of water rights increases farm net margin by 13.4 million euros/year (7.6%), an increase that allows farmers to pay for more desalinated water than in the prohibition alternative, thus reducing the impact on agricultural production and employment. Finally, the budgetary cost is 31.2 million euros/year, compared to 48.7 million euros/year in the current availability scenario. Again, if we compare this alternative with the current situation (second column in Table 6) we can see that the values of all economic indicators are significantly increased because of the use of desalinated resources (Figure 4).

[Table 7]

In this second scenario, the effectiveness of the **environmental tax on groundwater extraction** is improved and its negative impact notably reduced, as the

Martínez-Granados, D., Calatrava, J. (2014). "The role of desalination to address aquifer overdraft in SE Spain". *Journal of Environmental Management* 144: 247-257.

availability of desalination makes water demand less inelastic and thus a lower tax is required to eliminate non-renewable pumping (0.454 euros/m³/year). The tax has the same impact in terms of lost agricultural production and employment (fifth column of Table 7) as the purchase of groundwater rights but, unlike the latter, it reduces farmers' net margin (a 17.7% in this scenario). On the other hand, public revenue from the tax is 13.3 million euros per year, compared to 20.7 million euros per year in the current water availability scenario. In figure 4 we can see that, compared with the current situation, the environmental tax has a similar impact, in terms of agricultural production and employment, to that of the purchase of water rights but a lower impact, in terms of net margin, than the prohibition of non-renewable groundwater pumping.

[Figure 4]

Finally, the option of **subsidising desalinated water** is the only alternative with the potential to improve agricultural production, employment and net margin. In principle, groundwater would be replaced by desalinated water at a similar, or even lower, unitary cost for water. Obviously, there would be a significant cost for the public budget that would reduce its effectiveness. However, such budgetary cost is significantly lower than the cost of eliminating aquifer overdraft by purchasing water rights (23.4 million euros/year compared to 31.2 million euros/year). However, the high value of irrigation water provides a surprising result. Even for a subsidy of 0.42 euros/m³ that makes desalinated water virtually free (see water prices in Table 4), aquifer overexploitation is not eliminated (Figure 5). In the other alternatives, non-renewable groundwater pumping was eliminated either because it was prohibited, because farmers sold their rights, or because taxation made its cost unbearable. In this case, farmers can use groundwater, desalinated water at the current price or desalinated water with a subsidised price (in exchange for not using groundwater).

The fact that farmers may have access to desalinated water, even at a higher price than groundwater, reduces the effectiveness of subsidising its price because these resources are already available. Because of the high water scarcity and profitability of irrigation in the area, the farmers use all the available desalination but not all of it at a subsidised price. Instead, they choose to partly reduce groundwater use so as to get access to some cheaper desalinated water, but also to use desalinated water at its full price. As a result, farmers can use more water than with other instruments. The amount

Martínez-Granados, D., Calatrava, J. (2014). "The role of desalination to address aquifer overdraft in SE Spain". *Journal of Environmental Management* 144: 247-257.

of water used in the area is reduced with respect to the "no intervention" alternative, but it is still greater than with the other instruments.

[Figure 5]

6 Conclusions

Aquifer overdraft is a major environmental issue in Southeast Spain and it is especially severe in the Guadalentín basin, one of the most productive agricultural areas of Europe. The alternatives considered by the responsible water authority to face this problem are the public purchase of groundwater rights and the substitution of over-exploited groundwater for desalinated seawater resources that will be available in the near future. Choosing these or other instruments requires an assessment of their effectiveness and economic impact in terms of agricultural activity, social impact and budgetary cost. In this paper we have simulated the economic impact of some of the alternatives that can be used and assessed their economic impact using several indicators.

One option to eliminate aquifer overdraft is restricting groundwater pumping to *the aquifers' recharge level*. In the current situation, where groundwater is a major source of water supply and alternative resources are scarce, it would have a severe economic impact on the agricultural sector.

The purchase of groundwater rights to reduce water demand is an attractive alternative for the administration. It permanently reduces extractions and does not harm farmers' income, as they are compensated. However, it has both a very high public budgetary cost and a similar, though less negative, impact on the economy of affected rural areas to that of the prohibition of non-renewable pumping.

Establishing an environmental tax on groundwater extractions has little effect on the level of abstractions, as water demand is very inelastic because of the high farm profitability, the already high cost of water resources, the reduced potential for water saving in a technologically advanced agricultural system and the lack of alternative resources to substitute groundwater. A high tax eliminates aquifers' depletion with a similar impact to that of the restriction of extractions, as a consequence of both, reduced

Martínez-Granados, D., Calatrava, J. (2014). "The role of desalination to address aquifer overdraft in SE Spain". *Journal of Environmental Management* 144: 247-257.

water use and increased cost of groundwater resources. Its only advantage is that it generates tax revenues.

The availability of desalinated resources in the mid-term completely changes the effectiveness and impact of the proposed management alternatives. Our results suggest that the demand for these resources is significant, as half of the available resources from 2015 onwards would be used despite their relatively high price for farmers, with unquestionable benefits for the agricultural sector. However, this increased use of desalination does not reduce groundwater extractions because of the severe water scarcity in the area of study. Neither does it result in all the desalinated water available being used because it is more expensive for farmers than other sources of water. This is a relevant result, as it goes against both those who claim that there is no demand for desalinated water because of its high price for farmers, and those who claim that, just by making desalinated water available for farmers, groundwater extractions will be reduced and the demand for irrigation water fulfilled.

Overall, the economic impact of all the analysed alternatives is significantly reduced with the increase in desalination, as farmers can substitute groundwater with desalinated water. The existence of an alternative, though more expensive, source of water supply makes the demand for water less inelastic and therefore results in a significantly lower purchase price for groundwater rights (therefore a lower cost for the administration) and a significantly lower environmental tax needed to eliminate non-renewable pumping.

A fourth alternative is to subsidise desalinated water in exchange for reducing groundwater pumping so as to lower the price differential between desalination and groundwater. This alternative has a lower, though still significant, cost for the government than that of purchasing water rights, but has no negative impacts on the agricultural sector. Surprisingly, even with very cheap desalinated water, groundwater depletion is not eliminated, as farmers would increase water use by paying a higher price for part of the desalinated water and by maintaining some level of non-renewable groundwater use.

In summary, all the alternatives aimed at eliminating aquifer overpumping have significant economic impacts on the agricultural sector, although the existence of abundant but expensive desalinated water resources would reduce, but not eliminate,

Martínez-Granados, D., Calatrava, J. (2014). "The role of desalination to address aquifer overdraft in SE Spain". *Journal of Environmental Management* 144: 247-257.

such negative impacts. Choosing the right one thus depends on the relative weights given to the impact on the agricultural sector and to the public cost of the measure.

Nevertheless, it must be taken into account that the success of any intervention depends on the cooperation of users. In this sense, the purchase of water rights is likely to be better received by farmers than the prohibition of non-renewable pumping or the environmental tax. It is very unlikely that a tax greater than a few euro cents could be set up in Spain or that non-renewable pumping would be restricted without any type of compensation, as the experiences in other Spanish basins have shown (Esteban and Albiac, 2011; Garrido *et al.*, 2013). These two alternatives are therefore highly unfeasible from the political point of view. The solution could be a combination of instruments (including some subsidisation of desalination) that would share the cost of aquifers' recovery among farmers and the administration with the lowest possible impact on the agricultural sector.

7 Acknowledgements

The authors acknowledge the Spanish National Institute for Agricultural and Food Research and Technology (INIA) and FEDER (Fondo Europeo de Desarrollo Regional) for the financial support of this study through the research Project with grant number RTA2010-00109-C04-03, directed by Javier Calatrava Leyva.

8 References

- Albiac, J., Hanemann, M., Calatrava, J., Uche, J., Tapia, J. (2006). The rise and fall of the Ebro water transfer. *Natural Resources Journal*, 46:727-757.
- Berbel, J., Calatrava, J., Garrido, A. (2007). "Water pricing and irrigation: a review of the European experience". In Molle, F. and Berkoff, J. (Eds.): *Irrigation Water pricing Policy: The Gap Between Theory and Practice*. CAB International, Oxon. Pp. 295-327.
- Calatrava, J., Barberá, G.G., Castillo, V.M. (2011). Farming practices and policy measures for agricultural soil conservation in semi-arid Mediterranean areas: The case of the Guadalentín basin in southeast Spain. *Land Degradation and Development*, 22:58-69.

Martínez-Granados, D., Calatrava, J. (2014). "The role of desalination to address aquifer overdraft in SE Spain". *Journal of Environmental Management* 144: 247-257.

- Calatrava, J., Garrido, A. (2010). Measuring irrigation subsidies in Spain: An application of the GSI method for quantifying subsidies. International Institute for Sustainable Development (IISD), Geneva, Switzerland.
- Calatrava, J., Martínez-Granados, D. (2012). El valor de uso del agua en el regadío de la cuenca del Segura y en las zonas regables del trasvase Tajo-Segura. *Economía Agraria y Recursos Naturales* 12(1): 5-32
- Carmona, G., Varela-Ortega, C., Bromley, J. (2011). The Use of Participatory Object-Oriented Bayesian Networks and Agro-Economic Models for Groundwater Management in Spain. *Water Resources Management*, 25:1509-1524.
- CHS (2006). *Plan de Actuación en Situaciones de Alerta y Eventual Sequía en la Cuenca del Segura*. Confederación Hidrográfica del Segura, Murcia, Spain.
- CHS (2008a). *Esquema provisional de temas importantes de la Demarcación Hidrográfica del Segura*. Confederación Hidrográfica del Segura, Murcia.
- CHS (2008b). Informe de evaluación preliminar del impacto económico de las tarifas de los recursos externos para eliminar el déficit. Horizonte 2015. Confederación Hidrográfica del Segura, Murcia, Spain.
- Downward, S.R., Taylor, R. (2007). An assessment of Spain's Programa AGUA and its implications for sustainable water management in the province of Almería, southeast Spain. *Journal of Environmental Management*, 82: 277-289.
- Esteban, E., Albiac, J. (2011). "Groundwater and ecosystems damages: Questioning the Gisser-Sánchez effect". *Ecological Economics*, 70:2062-2069.
- European Commission (2000). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. OJ L 327, 22.12.2000, p. 1–73.
- Garrido A., Calatrava, J. (2010). "Agricultural water pricing: EU and Mexico". Consultant report. Reference [COM/TAD/CA/ENV/EPOC/RD(2008)49]. OECD, OECD, Paris, France.
- Garrido, A., Rey, D., Calatrava, J. (2013). Water trading in Spain. In de Stefano, L. and Llamas, M.R. (Editors), "Water, Agriculture and the Environment in Spain: can we square the circle?" CRC Press, Leiden, The Netherlands. Pp 205-216.

Martínez-Granados, D., Calatrava, J. (2014). "The role of desalination to address aquifer overdraft in SE Spain". *Journal of Environmental Management* 144: 247-257.

- Giannoccaro, G., Prosperi, M. y Zanni, G. (2010). Assessing the Impact of Alternative Water Pricing Schemes on Income Distribution. *Journal of Agricultural Economics*, 61(3): 527-544.
- Graveline, N. (2013). Agriculture's adaptation to water management policies and global change: the interest of economic programming models. Doctoral Dissertation. Agro Paris Tech, Paris.
- Iglesias, E. (2002). La gestión de las aguas subterráneas en el acuífero Mancha Occidental. *Economía Agraria y Recursos Naturales*, 2(1): 69-88.
- Maestre-Valero, J.F., Martínez-Granados, D., Martínez-Alvarez, V., Calatrava, J. (2013). Socio-economic impact of evaporation losses from reservoirs under past, current and future water availability scenarios in the semi-arid Segura basin. *Water Resources Management* 27(5): 1411-1426.
- Martínez-Granados D, Maestre-Valero J.F, Calatrava J, Martínez-Alvarez V (2011). The economic impact of water evaporation losses from water reservoirs in the Segura basin, SE Spain. *Water Resources Management* 25(13): 3153-3175.
- Scheierling, S.M., Loomis, J.B., Young, R.A. (2006). Irrigation water demand: A meta-analysis of price elasticities. *Water Resources Research*, 42(1), doi:10.1029/2005WR004009.
- Schuerhoff M., Weikard H.P., Zetland D. (2013). The Life and Death of the Dutch Groundwater Tax. *Water Policy* 15(6): 1064-1077.
- Wheeler, S, H Bjornlund, M Shanahan, A Zuo. 2008. Price elasticity of water allocations demand in the Goulburn-Murray Irrigation District. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics* 52:37-56.

Martínez-Granados, D., Calatrava, J. (2014). "The role of desalination to address aquifer overdraft in SE Spain". *Journal of Environmental Management* 144: 247-257.

Figure Captions

Figure 1. Location of the Guadalentín basin in SE Spain

Figure 2. Irrigated areas in the Guadalentín basin

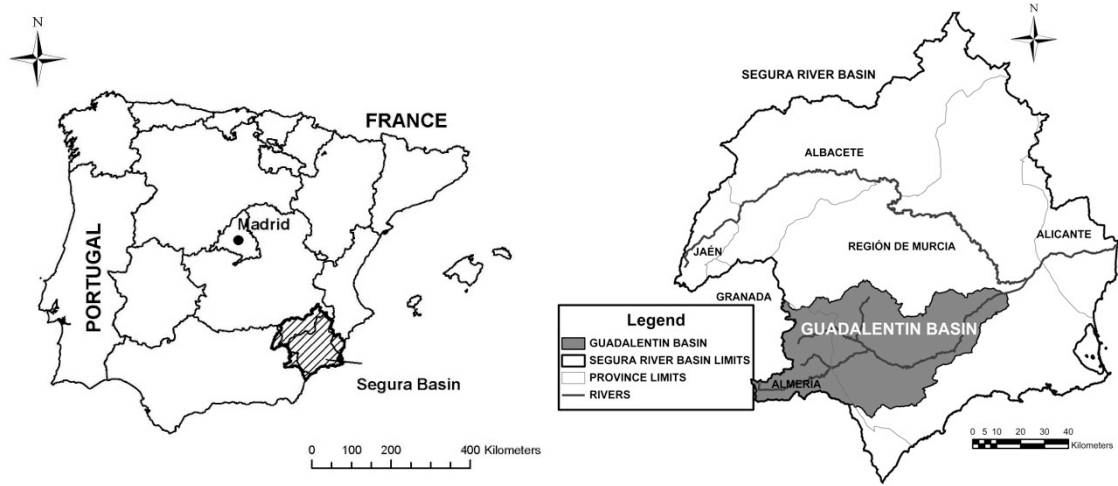
Figure 3. Aquifers in the Guadalentín basin

Figure 4. Economic impact of each management alternative under the scenario of future availability of desalinated water (proportional change with respect to the "no intervention" alternative in the current water availability situation)

Figure 5. Evolution of desalination water use and reduction of groundwater pumping with increasing subsidisation of desalination

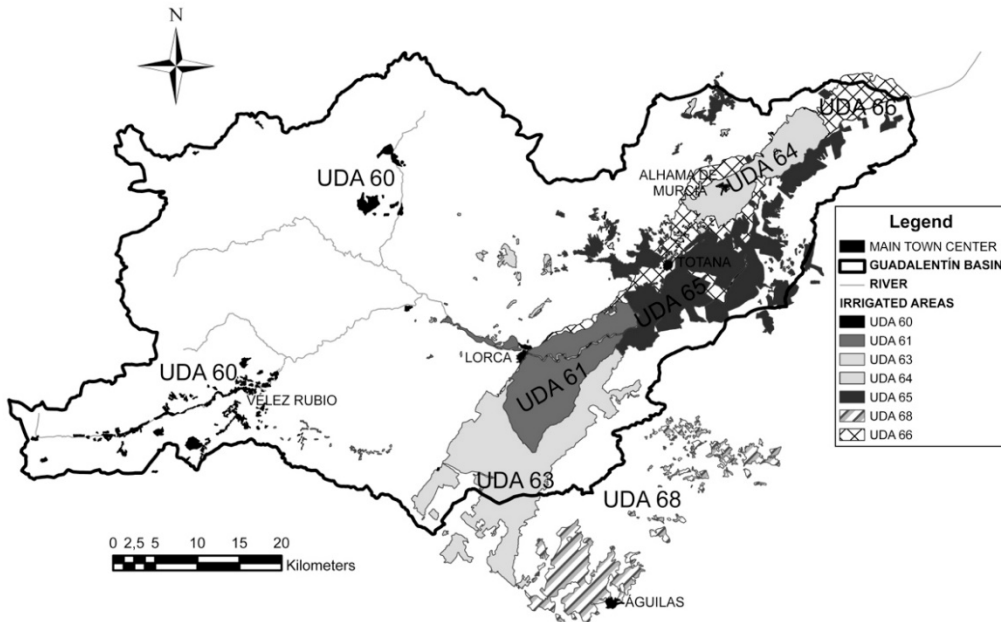
Martínez-Granados, D., Calatrava, J. (2014). "The role of desalination to address aquifer overdraft in SE Spain". *Journal of Environmental Management* 144: 247-257.

Figure 1. Location of the Guadalentín basin in SE Spain



Source: Own elaboration

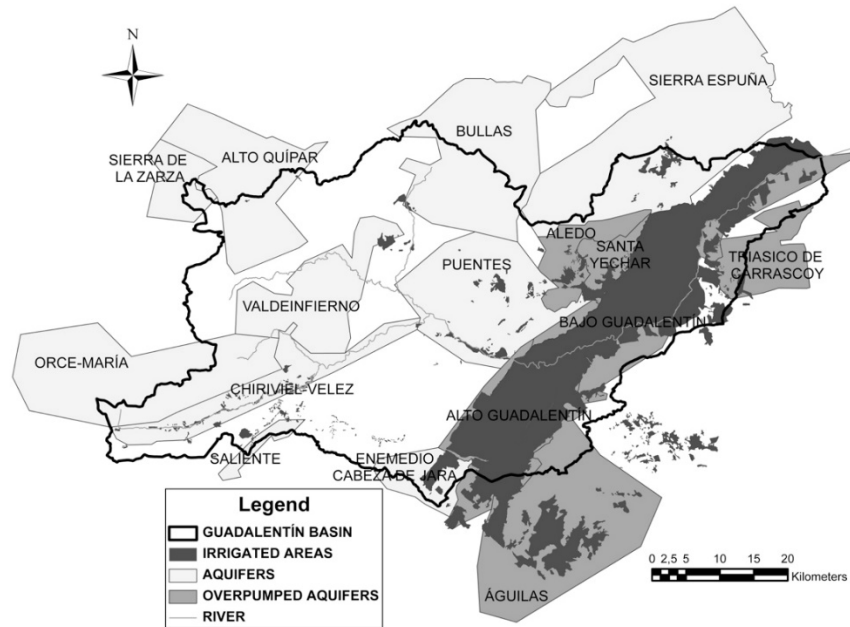
Figure 2. Irrigated areas in the Guadalentín basin



Source: Own elaboration

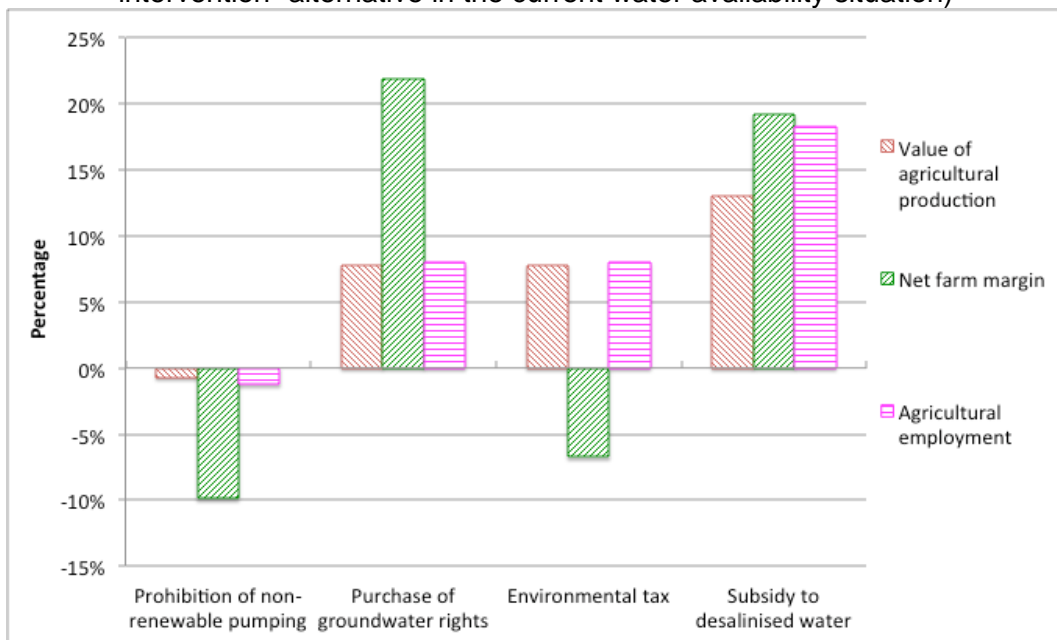
Martínez-Granados, D., Calatrava, J. (2014). "The role of desalination to address aquifer overdraft in SE Spain". *Journal of Environmental Management* 144: 247-257.

Figure 3. Aquifers in the Guadalentín basin



Source: Own elaboration

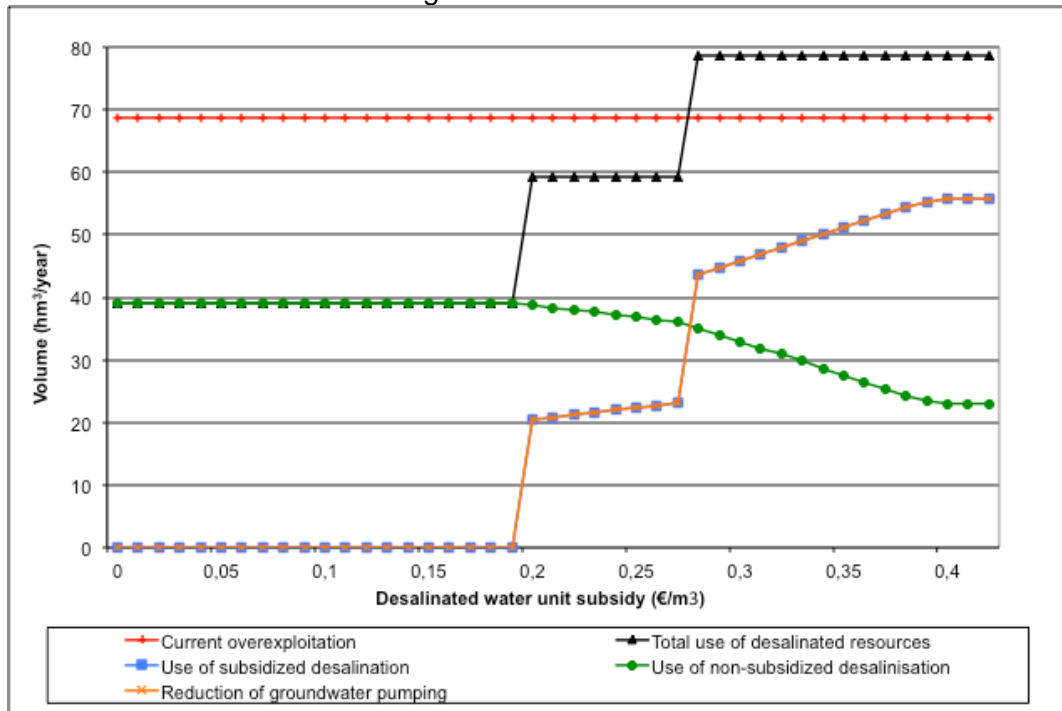
Figure 4. Economic impact of each management alternative under the scenario of future availability of desalinated water (proportional change with respect to the “no intervention” alternative in the current water availability situation)



Source: Own elaboration.

Martínez-Granados, D., Calatrava, J. (2014). "The role of desalination to address aquifer overdraft in SE Spain". *Journal of Environmental Management* 144: 247-257.

Figure 5. Evolution of desalination water use and reduction of groundwater pumping with increasing subsidisation of desalination



Source: Own elaboration.

Table 1. Area and water demand of the irrigated areas served from the Guadalentín basin's aquifers.

Irrigated area (name and code)	Total area (ha)	Irrigable area (ha)	Water demand (Mm ³ /yr.)	Available resources (Mm ³ /yr.)
Regadíos aguas arriba de Puentes (60)	2,411	1,742	6.7	5.6
Regadío de Lorca (61)	11,782	9,013	49.8	34.7
Acuíferos del Alto Guadalentín (63)	21,266	9,942	54.1	36.0
Mixtos del Bajo Guadalentín (64)	7,885	5,027	29.2	19.1
Subterráneas del Bajo Guadalentín (65)	21,362	12,710	72.0	38.9
Nuevos regadíos Lorca y Valle del Guadalentín (66)	10,798	7,802	45.4	13.6
Águilas (68)	9,405	4,397	27.0	21.4
TOTAL	84,909	50,633	284.2	169.3

Source: Own-elaboration using data from the Segura River Basin Authority (CHS, 2008a, 2008b).

Martínez-Granados, D., Calatrava, J. (2014). "The role of desalination to address aquifer overdraft in SE Spain". *Journal of Environmental Management* 144: 247-257.

Table 2. Available water rights and concessions in the irrigated areas served from the Guadalentín basin's aquifers (Mm³/year).

Irrigated area	60	61	63	64	65	66	68	TOTAL
Surface water	2.6	13.9	0.0	4.1	1.1	0.0	0.0	21.7
Resources from the Tajo-Segura Transfer	0.0	30.0	0.9	5.1	6.2	22.7	0.0	64.9
Treated wastewater	0.0	4.4	0.3	0.5	0.5	0.0	1.3	7.0
Desalinated water (currently)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.0	8.0
Groundwater resources	4.1	1.5	37.0	13.4	37.1	0.0	12.2	105.3
Total resources	6.7	49.8	38.2	23.1	44.9	22.7	21.5	206.9

Source: Own-elaboration using data from the Segura River Basin Authority (CHS, 2006 and 2008b).

Table 3. Currently available water resources in the irrigated areas served from the Guadalentín basin's aquifers and non-renewable groundwater pumping (Mm³/year).

Irrigated area	60	61	63	64	65	66	68	TOTAL
Surface water	2.1	11.1	0.0	3.3	0.9	0.0	0.0	17.4
Resources from the Tajo-Segura Transfer	0.0	18.0	0.5	3.1	3.7	13.6	0.0	38.9
Treated wastewater	0.0	4.4	0.3	0.5	0.5	0.0	1.3	7.0
Desalinated water (currently)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.0	8.0
Groundwater resources	3.6	1.2	35.1	12.2	33.8	0.0	12.1	98.0
Total resources	5.6	34.7	36.0	19.1	38.9	13.6	21.4	169.3
Non-renewable pumping	1.4	0.0	27.6	7.6	20.5	0.0	11.6	68.7

Source: Own-elaboration using data from the Segura River Basin Authority (CHS, 2006; 2008b). Groundwater resources include infiltration from water applications to crops. Total availability of desalinated water in 2015 is expected to be approximately 80 Mm³/year.

Martínez-Granados, D., Calatrava, J. (2014). "The role of desalination to address aquifer overdraft in SE Spain". *Journal of Environmental Management* 144: 247-257.

Table 4. Cost of water for farmers by source of water (€/m³).

Irrigated area (code)	Surface water	Resources from the Tajo-Segura Transfer	Treated wastewater	Desalinated water	Groundwater resources
60	0.05	-	-	0.45	0.30
61	0.05	0.127	0.08	0.45	0.225
63	-	0.127	0.08	0.44	0.25
64	0.05	0.127	0.08	0.45	0.18
65	0.05	0.127	0.08	0.45	0.18
66	-	0.127	-	0.45	-
68	-	-	0.08	0.42	0.125

Source: Own-elaboration using data from the Segura River Basin Authority (CHS, 2008a) and data from a survey made in 2012 to the irrigation districts in the area. Differences in the costs of desalinated water are explained by the transportation costs to each area.

Table 5. Alternatives analysed and scenarios of desalinated water availability.

Alternative	Current availability of desalinated water	Future availability of desalinated water (from 2015)
No intervention	X	X
Prohibition of overdraft	X	X
Purchase of groundwater rights	X	X
Subsidy for desalinated water if groundwater pumping is reduced		X
Environmental tax on groundwater use	X	X

Source: Own-elaboration.

Martínez-Granados, D., Calatrava, J. (2014). "The role of desalination to address aquifer overdraft in SE Spain". *Journal of Environmental Management* 144: 247-257.

Table 6. Economic impact of eliminating aquifer overdraft using each alternative under the scenario of current availability of desalinated water.

	No intervention	Prohibition of non-renewable groundwater pumping	Purchase of groundwater rights (0.709 €/m ³ /year)	Environmental tax (0.709 €/m ³ /year)
Total water use (Mm³/year)	169.3	100.6 (-40.6%)	100.6 (-40.6%)	100.6 (-40.6%)
Groundwater use (Mm³/year)	98.0	29.3 (-70.1%)	29.3 (-70.1%)	29.3 (-70.1%)
Reduction in Groundwater use (Mm³/year)	0.0	68.7	68.7	68.7
Desalinated water use (Mm³/year)	8.0	8.0 (0%)	8.0 (0%)	8.0 (0%)
Value of agricultural production (million euros/year)	448.0	304.8 (-32.0%)	319.6 (-28.7%)	319.6 (-28.7%)
Net farm margin (million euros/year)	155.6	116.5 (-25.1%)	170.9 (+9.8%)	101.4 (-34.8%)
Agricultural employment (workers/year)	12,189	7,970 (-34.6%)	8,028 (-34.1%)	8,028 (-34.1%)
Budgetary cost (million euros/year)	0,0	0.0	48,7	-20,7

Source: Own elaboration. Proportional change with respect to "no intervention" in brackets.

Martínez-Granados, D., Calatrava, J. (2014). "The role of desalination to address aquifer overdraft in SE Spain". *Journal of Environmental Management* 144: 247-257.

Table 7. Economic impact of eliminating aquifer overdraft using each alternative under the scenario of future availability of desalinated water (from 2015).

	No intervention	Prohibition of non-renewable groundwater pumping	Purchase of groundwater rights (0.454 €/m ³ /year)	Environmental tax (0.454 €/m ³ /year)	Subsidy for desalinated water (0.42 €/m ³ /year)
Total water use (Mm³/year)	200.3	163.7 (-18.3%)	167.7 (-16.3%)	167.7 (-16.3%)	184.3 (-8.0%)
Groundwater use (Mm³/year)	98.0	29.3 (-70.1%)	29.3 (-70.1%)	29.3 (-70.1%)	42.3 (-56.8%)
Reduction in Groundwater use (Mm³/year)	0.0	68.7	68.7	68.7	55.7
Desalinated water use (Mm³/year)	39.1	71.1 (+82.1%)	75.1 (+92.4)	75.1 (+92.4)	78.7 (+101.5)
Value of agricultural production (million euros/year)	532.5	444.8 (-16.5%)	483.0 (-9.3%)	483.0 (-9.3%)	506.2 (-4.9%)
Net farm margin (million euros/year)	176.2	140.2 (-20.4%)	189.6 (+7.6%)	145.1 (-17.7%)	185.5 (+5.3%)
Agricultural employment (workers/year)	15,051	12,038 (-20.0%)	13,165 (-12.5%)	13,165 (-12.5%)	14,412 (-4.2%)
Budgetary cost (million euros/year)	0.0	0.0	31.2	-13.3	23.4

Source: Own elaboration. Proportional change with respect to the "no intervention" alternative in brackets.

Capítulo VI. Conclusiones

- A.1. La combinación de métodos para estimar la evaporación en masas de agua y la modelización económica ha permitido evaluar el impacto económico de las pérdidas de agua por evaporación en los grandes embalses y balsas de riego de la cuenca del Segura.
- A.2. Las pérdidas por evaporación en las balsas de riego triplican las pérdidas por evaporación en grandes embalses, localizándose principalmente en las zonas donde se desarrolla el regadío con mayor rentabilidad de la cuenca.
- A.3. Las pérdidas por evaporación en balsas de riego producen un notable impacto económico sobre el sector agrario, contrarrestando una parte importante de los beneficios obtenidos con la utilización de las técnicas más eficientes de riego.
- A.4. Los futuros escenarios de disponibilidad de agua en la cuenca del Segura, definidos principalmente en función de los efectos del cambio climático, ponen de manifiesto una intensificación de los problemas de escasez en la cuenca del Segura, incrementándose progresivamente la importancia hidrológica y económica de las pérdidas por evaporación en balsas y embalses.
- A.5. Desde el punto de vista hidrológico, las reducciones en la disponibilidad de agua en posibles escenarios futuros conducen a una disminución en la cantidad total de las pérdidas por evaporación, pero también a un aumento significativo de la importancia relativa de dichas pérdidas.
- A.6. Desde una perspectiva económica, el impacto negativo de las pérdidas por evaporación para escenarios de creciente escasez aumenta a medida que lo hacen dichas pérdidas, reduciendo el valor de la producción agraria, el margen neto de las explotaciones, la superficie cultivada y el empleo agrario.
- A.7. Resulta necesario tener en cuenta las pérdidas por evaporación en la gestión y planificación del agua, incorporándolas al balance hídrico de la

cuenca, especialmente en cuencas áridas y semiáridas. Sus importantes impactos hidrológicos y económicos deben ser considerados para evaluar alternativas de gestión a nivel de cuenca, colectivos de riego y explotaciones, mejorando de esta manera la eficiencia técnica y económica de uso del agua.

- A.8. Los resultados de este estudio ponen de relieve la necesidad de técnicas alternativas para reducir la evaporación en embalses y balsas de riego en regiones con estrés hídrico como la cuenca del Segura. Las estrategias más comunes para la adaptación a la incipiente escasez de agua se basan en la construcción de nuevos embalses, lo que supone un aumento de la superficie de agua y, como consecuencia del futuro aumento en la tasa de evaporación, podría dar lugar a mayores pérdidas de agua, contrarrestando los efectos positivos del aumento de la capacidad de almacenamiento de agua.

- B.1. La elección de los instrumentos o alternativas de gestión para hacer frente al problema de la sobreexplotación de acuíferos requiere de una evaluación de su eficacia e impacto económico en términos de rentabilidad de la actividad agraria, empleo agrario y coste presupuestario soportado por la Administración.

- B.2. Los resultados de esta tesis ponen de manifiesto cómo, en una situación de disponibilidad de recursos como la actual, restringir los bombeos de agua subterránea al nivel de recarga natural de los acuíferos, tendría un gran impacto sobre el sector agrario.

- B.3. La compra de derechos de agua subterránea por parte de la Administración, reduciría permanentemente los bombeos no renovables, resolviendo el problema de la sobreexplotación y respetando la renta de los agricultores, aunque a costa de una notable reducción de la producción y el empleo agrario y un elevado coste presupuestario.

- B.4. La imposición de una tasa ambiental a las extracciones tiene una efectividad reducida ya que la demanda de agua en la zona de estudio es muy inelástica.

- B.5. La disponibilidad a medio plazo de agua desalinizada mejora la eficacia de todas las alternativas de gestión analizadas y reduce su impacto, aunque no lo eliminaría completamente, ya que los agricultores pueden sustituir los recursos subterráneos por recursos desalinizados.
- B.6. La potencial demanda de recursos desalinizados es notable, ya que, de acuerdo con los resultados obtenidos, se utilizarían la mitad de los recursos que estarán disponibles a partir del año 2015. Pese a ello no se reducirían las extracciones debido a la severa escasez hídrica de la zona de estudio, ni se utilizaría todo el agua desalinizada disponible por ser un recurso más caro.
- B.7. Subvencionar el precio del agua desalinizada a cambio de reducir las extracciones de agua subterránea tiene un menor coste para la Administración que la compra pública de derechos de agua y un reducido impacto negativo sobre el sector agrario. Sin embargo, incluso con un precio bajo de agua desalinizada no se eliminaría la sobreexplotación de los acuíferos, ya que a los agricultores les interesaría utilizar una parte del agua desalinizada subvencionada, reduciendo parcialmente las extracciones, y otra parte sin subvencionar, manteniendo cierto nivel de bombeos no renovables de agua subterránea e incrementando el consumo total de agua.
- B.8. Elegir entre las medidas analizadas dependerá de la importancia relativa que se dé a su impacto sobre el sector agrario frente al coste presupuestario para alcanzar el objetivo de eliminar la sobreexplotación de acuíferos.

Futuras líneas de investigación que se derivan de esta tesis

1. Aplicar la metodología desarrollada para evaluar hidrológica y económicamente las pérdidas por evaporación en otras Demarcaciones Hidrográficas, de tal manera que se puedan tomar medidas que contribuyan a un ahorro efectivo de agua.
2. Evaluar el impacto económico e hidrológico de la adopción generalizada de técnicas o estrategias de gestión orientadas a la reducción de la evaporación de masas de agua a escala de cuenca.
3. Analizar la viabilidad económico-financiera de inversiones en técnicas de reducción de la evaporación (coberturas de sombreado, coberturas flotantes, monolayers) en explotaciones agrarias concretas, analizando los valores críticos del precio del agua en cada caso.
4. Analizar la efectividad de combinaciones de los instrumentos analizados para compartir el coste de recuperación de los acuíferos entre los agricultores y la Administración, generando el menor impacto posible sobre el sector agrario.
5. Analizar la efectividad e impacto de la restricción de extracciones mediante planes de gestión que incluyan el establecimiento de cuotas y su intercambio en mercados de agua o bancos de agua, así como el intercambio o compra de recursos hídricos entre diferentes zonas e incluso cuencas.
6. Extrapolar esta metodología a otras zonas de la cuenca del Segura con problemas graves de sobreexplotación de acuíferos como es el caso de la zona del Altiplano, proponiendo alternativas de permuta de recursos subterráneos por desalinizados e intercambios de recursos hídricos entre diferentes partes de la cuenca.

Capítulo VII. Referencias

- Albiac, J., Hanemann, M., Calatrava, J., Uche, J. y Tapia, J. (2006). "The rise and fall of the Ebro water transfer". *Natural Resources Journal*, 46: 727–757.
- Albiac, J., Tapia, J., Meyer, A., Hanemann, M., Mema, M., Calatrava, J., Uche, J. y Calvo, E. (2008). "Los problemas económicos de la planificación hidrológica". *Revista de Economía Aplicada*, XVI(47): 25–50.
- Alcalá Agulló, F. y Sancho Portero, I. (2002). "Agua y producción agrícola: un análisis econométrico del caso de Murcia". *Revista Española de Estudios Agrosociales y Pesqueros*, 197: 129–157.
- Alcamo, J., Döll, P., Henrichs, T., Kaspar, F., Lehner, B., Rösch, T. y Siebert, S. (2003). "Global estimates of water withdrawals and availability under current and future "business-as-usual" conditions". *Hydrological Sciences Journal*, 48: 339–348.
- Allen, J.B. y Crow, F.R. (1971). "Predicting lake evaporation by performance of evaporation ponds, pans and tanks". *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 14: 458–463.
- Amigues, J.P., Bonnieux, F., Le Goffe, P. y Point, P. (1995). "Valorisation des usages de l'eau. INRA-ECONOMICA, Paris.
- Amini Fasakhodi, A., Nouri, S.H. y Amini, M. (2010). "Water resources sustainability and optimal cropping pattern in farming systems; a multi-objective fractional goal programming approach". *Water Resources Management*, 24(15): 4639–4657.
- Anderson, J.M., Duck, R.W. y McManus, J. (1999). "Thermal radiometry: a rapid means of determining surface water temperature variations in lakes and reservoirs". *Journal of Hydrology*, 173: 131–144.
- Arriaza, M., Gómez Limón, J. y Ruiz, P. (2003). "Evaluación de alternativas de desacoplamiento total de ayudas COP: El caso de la agricultura de regadío del Valle del Guadalquivir". *Economía Agraria y Recursos Naturales*, 3(6): 129–153.
- Arriaza, M., Gómez-Limón, J. y Upton, M. (2002). "Local water markets for irrigation in southern Spain: a multicriteria approach". *The Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 46(1): 21–43.

- Ballesteros, E., Alarcon, S. y Garcia-Bernabeu, A. (2002). "Establishing politically feasible water markets: a multi-criteria approach". *Journal of Environmental Management*, 65(4): 411–429.
- Bartolini, F., Bazzani, G.M., Gallerani, V., Raggi, M. y Viaggi, D. (2007). "The impact of water and agriculture policy scenarios on irrigated farming systems in Italy: An analysis based on farm level multi-attribute linear programming models". *Agricultural Systems*, 93(1-3): 90–114.
- Bazzani, G.M., Pasquale, S.D., Gallerani, V., Morganti, S., Raggi, M. y Viaggi, D. (2005). "The sustainability of irrigated agricultural systems under the Water Framework Directive: first results". *Environmental Modelling and Software*, 20: 165–175.
- Berbel, J. y Gutiérrez, C. (Eds.) (2005). "Sustainability of European Irrigated Agriculture under Water Framework Directive and Agenda 2000". *EUR 21220*. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Berbel, J. y Mesa, P. (2007). "Valoración del agua de riego por el método de precios cuasi-hedónicos: aplicación al Guadalquivir". *Economía Agraria y Recursos Naturales*, 7(14): 127–144.
- Berbel, J., Mesa-Jurado, M. y Pistón, J. (2011). "Value of Irrigation Water in Guadalquivir Basin (Spain) by Residual Value Method". *Water Resources Management*, 25(6): 1565–1579.
- Bruin, H.A.R. (1978). "A Simple Model for Shallow Lake Evaporation". *Journal of Applied Meteorology*, 17: 1132–1134.
- Brutsaert, W. (1982). "Evaporation into the Atmosphere". Reidel, Dordrecht, 299 pp.
- Calatrava, J. y Garrido, A. (2001). "Agricultural Subsidies, water pricing and farmers' response: Implications for water policy and CAP reform". En Dosi, C. (ed.): *Agricultural Use of Groundwater: Towards Integration between Agricultural Policy and Water Resources Management*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 241–257.
- Calatrava, J. y Garrido, A. (2001). "Análisis del efecto de los mercados de agua sobre el beneficio de las explotaciones, la contaminación por nitratos y el empleo eventual agrario". *Economía Agraria y Recursos Naturales*, 1(2): 153–173.

- Calatrava, J. y Garrido, A. (2005a). "Modelling water markets under uncertain water supply". *European Review of Agricultural Economics*, 32(2): 119–142.
- Calatrava, J. y Garrido, A. (2005b). "Spot water markets and risk in water supply". *Agricultural Economics*, 33(2): 131–143.
- Calatrava, J. y Garrido, A. (2006). "Difficulties in adopting formal water trading rules within users' associations". *Journal of Economic Issues*, 40(1): 27–44.
- Calatrava, J. y Gómez-Ramos, A. (2009). "El papel de los mercados de agua como instrumento de asignación de recursos hídricos en el regadío español". En Gómez-Limón, J.A., Calatrava, J., Garrido, A., Sáez, F.J. y Xabadía, A. (Eds.): *La economía del agua de riego en España*. Fundación Cajamar, Almería: 295–319.
- Calatrava, J. y Martínez-Granados, D. (2012). "El valor de uso del agua en el regadío de la cuenca del Segura y en las zonas regables del trasvase Tajo-Segura". *Economía Agraria y Recursos Naturales*, 12(1): 5–32.
- Calatrava, J., Barberá, G.G. y Castillo, V.M. (2011). "Farming practices and policy measures for agricultural soil conservation in semi-arid Mediterranean areas: the case of the Guadalentín basin in southeast Spain". *Land Degradation and Development*, 22: 58–69.
- Carmona, G., Varela-Ortega, C. y Bromley, J. (2011). "The use of participatory object-oriented Bayesian networks and agro-economic models for groundwater management in Spain". *Water Resources Management*, 25: 1509–1524.
- Christodoulou, S.E. (2011). "Water resources conservancy and risk reduction under climatic instability". *Water Resources Management*, 25: 1059–1062.
- CHS (1998). *Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura*. Confederación Hidrográfica de la Cuenca del Segura, Murcia.
- CHS (2005). *Informe sobre los artículos 5, 6 y 7 de la DMA en la Cuenca del Segura (versión 3, 6 de mayo de 2005)*. Confederación Hidrográfica del Segura, Murcia.
- CHS (2006). *Plan de Actuación en Situaciones de Alerta y Eventual Sequía en la Cuenca del Segura*. Confederación Hidrográfica del Segura, Murcia.
- CHS (2007). *Estudio General sobre la Demarcación Hidrográfica del Segura (versión del 2 de julio de 2007)*. Confederación Hidrográfica del Segura, Murcia.

- CHS (2008a). *Esquema provisional de temas importantes de la Demarcación Hidrográfica del Segura*. Confederación Hidrográfica del Segura, Murcia.
- CHS (2008b). *Informe de evaluación preliminar del impacto económico de las tarifas de los recursos externos para eliminar el déficit. Horizonte 2015*. Confederación Hidrográfica del Segura, Murcia.
- Colino Sueiras, J. y Martínez-Paz, J. M. (2007). "Productividad, disposición al pago y eficiencia técnica en el uso del agua: la horticultura intensiva de la Región de Murcia". *Economía Agraria y Recursos Naturales*, 7(14): 109–125.
- Craig, I., Green, A., Scobie, M. y Schmidt, E. (2005). "Controlling evaporation loss from water storages". *National Centre for Engineering in Agriculture*. Publication No. 1000580/1, Queensland, Australia.
- Downward, S.R. y Taylor, R. (2007). "An assessment of Spain's Programa AGUA and its implications for sustainable water management in the province of Almería, southeast Spain". *Journal Environmental Management*, 82: 277–289.
- EC (2000). Directive 2000/60/EC (2000) of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000. "Establishing a framework for community action in the field of water policy". *Official Journal of European Communities*, 22.12.2000, L 327: 1–72.
- Esteban, E. y Albiac, J. (2011). "Groundwater and ecosystems damages: questioning the Gisser-Sánchez effect". *Ecological Economics*, 70: 2062–2069.
- Gallego Elvira, B. (2011). "Análisis de la evaporación en embalses de riego y de su reducción con coberturas de sombreado". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cartagena, Murcia.
- García Mollá, M. (2002). "Análisis de la influencia de los costes en el consumo de agua en la agricultura valenciana. Caracterización de las entidades asociativas para riego". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- Garrido, A. (2000). "A mathematical programming model applied to the study of water markets within the Spanish agricultural sector". *Annals of Operations Research*, 94(1-4): 105–123.

- Garrido, A. y Calatrava, J. (2009). "Trends in water pricing and markets". En Garrido, A. y Llamas, M.R. (Eds.): *Water Policy in Spain*. CRC Press, Taylor & Francis, Leiden, The Netherlands: 129–142.
- Garrido, A. y Calatrava, J. (2010). "Agricultural Water Pricing: EU and Mexico. Consultant report". Reference [COM/TAD/CA/ENV/EPOC/RD(2008)49]. OECD, Paris, France. Available at: <http://www.oecd.org/water>.
- Garrido, A., Rey, D. y Calatrava, J. (2013). "Water trading in Spain". In: In de Stefano, L. y Llamas, M.R. (Eds.), *Water, Agriculture and the Environment in Spain: Can We Square the Circle?* CRC Press, Leiden, The Netherlands, 205–216.
- Getirana, A.C.V., Malta, V.F. y Azevedo, J.P.S. (2008). "Decision process in a water use conflict in Brazil". *Water Resources Management*, 22: 103–118.
- Giannoccaro, G., Prosperi, M. y Zanni, G. (2010). "Assessing the impact of alternative water pricing schemes on income distribution". *Journal. Agricultural. Economic*, 61(3): 527–544.
- Gil, M., Garrido, A. y Gómez-Ramos, A. (2009). "Análisis de la productividad de la tierra y del agua en el regadío español". En Gómez-Limón, J.A., Calatrava, J., Garrido, A., Sáez, F.J. y Xabadia, A. (Eds.): *La economía del agua de riego en España*. Fundación Cajamar, Almería: 95–114.
- Gökbulak, F. y Özhan, S. (2006). "Water loss through evaporation from water surfaces of lakes and reservoirs in Turkey". *E-Water: Official Publication of the European Water Association (on line)*. <http://www.ewaonline.de>. ISSN 1994–8549.
- Gómez-Limón, J. A. y Martínez, Y. (2006). "Multi-criteria modelling of irrigation water market at basin level: A Spanish case study". *European Journal of Operational Research*, 173(1): 313–336.
- Gómez-Limón, J.A. y Riesgo, L. (2004). "Irrigation water pricing: differential impacts on irrigated farms". *Agricultural Economics*, 31(1): 47–66.
- Graveline, N. (2013). "Agriculture's adaptation to water management policies and global change: the interest of economic programming models". Tesis Doctoral. Agro Paris Tech, Paris.

- Gupta, V., Tadros, M., Bradshaw, R.W., Showalter, S.K., Miller, J.E., Evans, L. y Sasaki, D.Y. (2002). "Progress Report: Advanced Concepts Group Fy01-1362-LDRD, Solutions to National and Global Security Issues Based on Limited Freshwater Resources". SAND2002-0781. Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.
- Gutiérrez, C., Gómez, C.M. (2009). "Efectos de la política agraria sobre la política del agua". En Gómez-Limón, J.A., Calatrava, J., Garrido, A., Sáez, F.J., Xabadia, A. (Eds.): *La economía del agua de riego en España*. Fundación Cajamar, Almería: 365–381.
- Harbeck, G.E. (1962). "A practical field technique for measuring reservoir evaporation utilizing mass-transfer theory". *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 272-E: 101–105.
- Hellegers, P. y van Ierland, E. (2003). "Policy instruments for groundwater management in the Netherlands". *Environmental and Resource Economics*, 26(1): 163–172.
- Howitt, R.E. (1995). "Positive mathematical programming". *American Journal of Agricultural Economics*, 77: 329–342.
- Iglesias, A., Garrote, L., Flores, F. y Moneo, M. (2007). "Challenges to manage the risk of water scarcity and climate change in the Mediterranean". *Water Resources Management*, 21(5): 775–788.
- Iglesias, E. (2002). "La gestión de las aguas subterráneas en el acuífero Mancha Occidental". *Economía Agraria y Recursos Naturales*, 2(1): 69–88.
- Iglesias, E. y Blanco, M. (2004). "Impacto Socioeconómico y Ambiental de la Reforma de la PAC en los Regadíos Españoles". Comunicación presentada al *V Congreso de la Asociación Española de Economía Agraria*. Santiago de Compostela.
- Iglesias, E., Garrido, A. y Gómez-Ramos, A. (2003). "Evaluation of drought management in irrigated areas". *Agricultural Economics*, 29: 211–229.
- IPCC (2007). "Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change". Cambridge University Press, Cambridge, p 976.
- IPCC (2008). "Climate change and water technical paper of the intergovernmental panel on climate change". IPCC Secretariat, Geneva, p 210.

- Jurak, D. (1989). "Effect of climate change on evaporation and water temperature". Proc Conference on *Climate and Water Helsinki I*: 138–148.
- Kahil, M.T., Dinar, A. y Albiac, J. (2015). "Modeling water scarcity and droughts for policy adaptation to climate change in arid and semiarid regions." *Journal of Hydrology* 522: 95–109.
- Linacre, E.T. (1994). "Estimating U.S. Class-A pan evaporation from few climatic data". *Water International.*, 19: 5–14.
- Lowe, L.D., Webb, J.A., Nathan, R.J., Etchells, T. y Malano, H.M. (2009). "Evaporation from water supply reservoirs: an assessment of uncertainty". *Journal of Hydrology*, 376: 261–274.
- Maestu, J. y Gómez, C.M. (2008). "Análisis Económico de los usos del agua en España". *Ambienta*, 75: 44–51.
- Martínez-Álvarez, V., González-Real, M.M., Baille, A. y Molina Martínez, J.M. (2007). "A novel approach for estimating the pan coefficient of irrigation water reservoirs. Application to South Eastern Spain". *Agricultural Water Management*, 92: 29–40.
- Martínez-Álvarez, V., González-Real, M.M., Baille, A., Maestre Valero, J.F. y Gallego Elvira, B. (2008). "Regional assessment of evaporation from agricultural irrigation reservoirs in a semiarid climate". *Agricultural Water Management*, 95: 1056–1066.
- Martínez-Granados, D., Maestre-Valero, J.F., Calatrava, J. y Martínez-Álvarez, V. (2011). "The economic impact of water evaporation losses from water reservoirs in the Segura basin, SE Spain". *Water Resources Management*, 25(13): 3153–3175.
- MED WS&D WG (2007). *Mediterranean water scarcity and drought report*. Mediterranean water scarcity & drought working group, European Commission Technical Report 009-2007. www.emwis.net/topics/WaterScarcity.
- Mejías, P., Varela-Ortega, C. y Flichman, G. (2004). "Integrating agricultural policies and water policies under water supply and climate uncertainty". *Water Resources Research*, 40, W07S03. doi: 10.1029/2004WR002877.
- MIMAM (2000). *Libro blanco del agua en España*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- MMA (2001). *Plan Hidrológico Nacional*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.

- Molina Martínez, J.M. (2004). "Caracterización y modelización de la evaporación en tanques evaporímetros y embalses de riego. Evaluación de los efectos de mallas de sombreo". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cartagena. Murcia.
- Molina Martínez, J.M., Martínez Álvarez, V., Baille, A. y González-Real, M.M. (2006). "Estimación de la evaporación en embalses de riego mediante un modelo de balance de energía". *Ingeniería del Agua*, 13: 219–229.
- Molina, J., García Aróstegui, J., Benavente, J., Varela, C., de la Hera, A. y López Geta, J. (2009). "Aquifers overexploitation in SE Spain: a proposal for the integrated analysis of water management". *Water Resources Management*, 23(13): 2737–2760.
- Molle, F. y Berkoff, J. (Eds.) (2007). "Irrigation Water pricing Policy: The Gap Between Theory and Practice". CAB International, Oxon.
- Moreno, J.M. *et al.* (2005). "Evaluación preliminar de los impactos en España del Cambio Climático". Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Morton, F.I. (1994). "Evaporation research – a critical review and its lessons for the environmental sciences". *Critical Review Environmental Science Technology*, 24: 237–280.
- Opricovic, S. (2009). "A compromise solution in water resources planning". *Water Resources Management*, 23: 1549–1561.
- Penman, H.L. (1948). "Natural evaporation from open water, bare soil and grass". *Royal Society of London Proceeding, Series A*, 193: 120–146.
- Priestley, C.H.B. y Taylor, R.J. (1972). "On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters". *Monthly Weather Review*, 100: 81–92.
- Regulwar, D.G. y Gurav, J.B. (2011). "Irrigation planning under uncertainty—a multi objective fuzzy linear programming approach". *Water Resources Management*, 25(5): 1387–1416.
- Riesgo, L. y Gómez-Limón, J. A. (2005). "Análisis de escenarios de políticas para la gestión pública de la agricultura de regadío". *Economía Agraria y Recursos Naturales*, 5(9): 81–114.

- Riesgo, L. y Gómez-Limón, J.A. (2006). "Multi-criteria policy scenario analysis for public regulation of irrigated agriculture". *Agricultural Systems*, 91(1-2): 1–28.
- Rigby, D., Alcon, F. y Burton, M. (2010). "Supply uncertainty and the economic value of irrigation water." *European Review of Agricultural Economics*, 37: 97–117.
- Santori, E. (2000). "A critical review on equations employed for the calculation of the evaporation rate from free water surfaces". *Solar Energy*, 68: 77–89.
- Santos, F.D., Forbes, K. y Moita, R. (2002). "Climate change in Portugal: scenarios: impacts and adaptation measures". SIAM project report. Gradiva, Lisbon.
- Scheierling, S.M., Loomis, J.B. y Young, R.A. (2006). "Irrigation water demand: A meta-analysis of price elasticities". *Water Resources Research*, 42(1), doi: 10.1029/2005WR004009.
- Scheierling, S.M., Young, R.A. y Cardon, G.E. (2004). "Determining the price-responsiveness of demands for irrigation water deliveries versus consumptive use". *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 29(2): 328–345.
- Schindler, D.W. y Donahue, W.F. (2006). "An impending water crisis in Canada's western prairie provinces". *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA (PNAS)*, 103: 7210–7216.
- Schröter, D., Cramer, W., Leemans, R., Prentice, I.C., Araújo, M.B., Arnell, N.W., Bondeau, A., Bugmann, H., Carter, T.R., Gracia, C.A., de la Vega-Leinert, A.C., Erhard, M., Ewert, F., Glendining, M., House, J.I., Kankaanpää, S., Klein, R.T.J., Lavorell, S., Linder, M., Metzger, M.J., Meyer, J., Mitchell, T.D., Reginster, I., Rounsevell, M., Sabaté, S., Sitch, S., Smith, B., Smith, J., Smith, P., Sykes, M.T., Thonicke, K., Thuiller, W., Tuck, G., Zaehle, S. y Zierl, B. (2005). "Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe". *Science*, 310: 1333–1337.
- Schuerhoff, M., Weikard, H.P. y Zetland, D. (2013). "The Life and Death of the Dutch Groundwater Tax". *Water Policy*, 15(6): 1064–1077.
- Singh V.P. y Xu C.Y. (1997). "Evaluation and generalization of 13 mass-transfer equations for determining free water evaporation". *Hydrological Processes*, 11: 311–323.

- Stanhill, G. (2002). "Is the Class-A evaporation pan still the most practical and accurate meteorological method for determining irrigation water requirements?". *Agricultural and Forest Meteorology*, 112: 233–236.
- Témez, J.R. (2007). "Consideraciones prácticas sobre la evaporación en embalses de la España peninsular". *Revista de Obras Públicas*, 3476: 15–22.
- Trenberth, K.E., Dai, A.G., Rasmussen, R.M. y Parsons, D.B. (2003). "The changing character of precipitation". *Bulletin of the American Meteorology Society*, 84: 1205–1217.
- Tsakiris, G. y Spiliotis, M. (2011). "Planning against long term water scarcity: a fuzzy multicriteria approach". *Water Resources Management*, 25: 1103–1129.
- Varela-Ortega, C., Sumpsi, J.M., Garrido, A., Blanco, M. y Iglesias, E. (1998). "Water Pricing Policies, Public Decision Making and Farmers' Response: Implications for Water Policy". *Agricultural Economics*, 19(1-2): 193–202.
- Wang, J., Cheng, G., Gao, Y., Long, A., Xu, Z., Li, X., Chen, H. y Barker, T. (2008). "Optimal water resource allocation in arid and semi-arid areas". *Water Resources Management*, 22: 239–258.
- Ward, F.A. (1987). "Economics of water allocation to instream uses in a fully appropriated river basin: evidence from a New Mexico wild river". *Water Resources Research*, 23: 381–392.
- Wheeler, S., Bjornlund, H., Shanahan, M. y Zuo, A., (2008). "Price elasticity of water allocations demand in the Goulburn-Murray Irrigation District". *Australian Journal of Agricultural Resource Economics*, 52: 37–56.
- Young, R.A. (2005). "Determining the economic value of water: Concepts and Methods". RFF Press, Washington.

Apéndice I. Índice de impacto de las publicaciones

Publicación 1

Referencia

Martínez-Granados, D., Maestre-Valero, J.F., Calatrava, J. y Martínez-Álvarez, V. (2011). "The economic impact of water evaporation losses from water reservoirs in the Segura basin, SE Spain". *Water Resources Management*, 25(13): 3153–3175.

Factor de impacto de la revista *Water Resources Management*

- Factor de impacto: 2,463
- Situada en el puesto 16 de 81 revistas indexadas en la categoría "Water Resources" (Cuartil 1 Q1)

Fuente: ISI Web of Knowledge. Journal Citation Reports, 2013 JCR Science Edition

Publicación 2

Referencia

Maestre-Valero, J.F., **Martínez-Granados, D.**, Martínez-Álvarez, V. y Calatrava, J. (2013). "Socio-economic impact of evaporation losses from reservoirs under past, current and future water availability scenarios in the semi-arid Segura basin". *Water Resources Management*, 27(5): 1411–1426.

Factor de impacto de la revista *Water Resources Management*

- Factor de impacto: 2,463
- Situada en el puesto 16 de 81 revistas indexadas en la categoría "Water Resources" (Cuartil 1 Q1)

Fuente: ISI Web of Knowledge. Journal Citation Reports, 2013 JCR Science Edition

Publicación 3

Referencia

Martínez-Granados D. y Calatrava J. (2014). "The role of desalinisation to address aquifer overdraft in SE Spain". *Journal of Environmental Management*, 144: 247–257.

Factor de impacto de la revista *Journal of Environmental Management*

- Factor de impacto: 3,188
- Situada en el puesto 39 de 216 revistas indexadas en la categoría "Environmental Sciences" (Cuartil 1 Q1)

Fuente: ISI Web of Knowledge. Journal Citation Reports, 2013 JCR Science Edition

“El agua es la fuerza motriz de toda la naturaleza”

Leonardo da Vinci

