

APOYO A LA TOMA DE DECISIONES SOBRE EL ESTABLECIMIENTO DE CUPOS DE AGUA EN ZONAS REGABLES

Lecina, S.^{1,2}, Merkley, G.P.³, Neale C.M.U.³

¹ Visiting Post-doctoral Scholar, Biological and Irrigation Engineering Dept. Utah State University. 4105 Old Main Hill. Logan, UT 84322 (Estados Unidos).

² Investigador, Unidad Suelos y Riegos, Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA-Gobierno de Aragón), Unidad Asociada a EEAD-CSIC. Avd. Montañana 930, Zaragoza (España). slecina@aragon.es.

³ Professor, Biological and Irrigation Engineering Dept. Utah State University. 4105 Old Main Hill. Logan, UT 84322 (Estados Unidos).

Resumen

El objetivo de este estudio es desarrollar y analizar una metodología que apoye el proceso de toma de decisiones para establecer cupos de agua como estrategia para la gestión de la demanda de agua en comunidades de regantes. La metodología desarrollada se basa en la evaluación y simulación de zonas regables. El modelo Ador-simulación ha sido aplicado con este propósito en dos diferentes comunidades de regantes con riego por gravedad de España y de EEUU. Los resultados indican que esta estrategia es útil para limitar la demanda de agua donde su gestión sea mejorable. Sin embargo, los cupos de agua producen desigualdades entre explotaciones donde la variabilidad de suelos e infraestructuras es importante. Este problema puede limitar la implementación de este tipo de estrategia especialmente en antiguas zonas regables.

Abstract

The objective of this study was to develop and analyze a methodology to support the decision-making process for water allocations as a strategy for water demand management in irrigation districts. The developed methodology is based on the evaluation and simulation of irrigated areas. The Ador-simulation model has been applied for this purpose in two different surface irrigation districts in Spain and the USA. The results indicate that this strategy is useful in limiting water demand where water management can be improved. However, water allocations produce inequalities among farms where the variability in soils and infrastructures is large. This constraint can limit the implementation of this kind of strategy, particularly in old irrigated areas.

1. Introducción

Evaluaciones de riego desarrolladas en diversas zonas regables españolas y norteamericanas han mostrado que el aprovechamiento del agua en la agricultura podría mejorar sustancialmente si se mejorase su gestión (Playán y Mateos, 2006; Clemmens et

al., 2008). La teoría económica ha desarrollado diversas estrategias para incentivar la optimización del aprovechamiento de los recursos hídricos cuando estos son escasos. La asignación de precios al agua, o los mercados de agua y de derechos sobre su uso son ejemplos de este tipo de estrategias.

La asignación de precios al agua puede llevarse a cabo con distintos fines como la recuperación de los costes del servicio de abastecimiento, la limitación de la demanda de agua o la consecución del equilibrio entre oferta y demanda entre sectores económicos que compiten por los recursos hídricos. En el sector agrario, diversos estudios han señalado que la asignación de precios volumétricos al agua tiene generalmente escasos efectos sobre la demanda al requerirse precios que pueden suponer un importante porcentaje de los beneficios netos de las explotaciones (Cornish et al, 2004; Helleger y Perry, 2006). En España, varios estudios empíricos han concluido que para que la demanda de agua disminuyese significativamente en la agricultura, los precios del agua requeridos supondrían una merma en torno al 40 % de los beneficios netos de las explotaciones, lo cual afectaría negativamente a la actividad agraria y al empleo rural (Berbel y Gómez-Limón, 2000). Cornish et al. (2004) han constado similares efectos en otras zonas del mundo. Sin embargo, estos mismos autores señalan que el establecimiento de cupos de agua podrían resultar una alternativa eficaz a los precios volumétricos con el fin de indicar su valor a los usuarios y evitar un uso superfluo de este recurso.

El objetivo de este trabajo es desarrollar una metodología para apoyar la toma de decisiones en el establecimiento de cupos de agua en comunidades de regantes. Dichos cupos se entienden como límites máximos de uso del agua que aseguran un adecuado aprovechamiento del agua sin limitar la producción agraria. Este trabajo no pretende realizar un análisis económico o legal de estos cupos, que se deja para posteriores estudios a realizar por especialistas en estos ámbitos. Se han considerado como casos de estudio dos zonas regables con sistemas de riego por superficie y cultivos extensivos, pero con diferentes condiciones de medio físico y de infraestructuras. Estas zonas se localizan en el norte de Utah (EEUU) y el valle medio del Ebro (España).

2. Las zonas de estudio

2.1. La Comunidad de Regantes V del Canal de Bardenas

La Comunidad de Regantes V (cinco; CRV) se encuentra situada en el valle medio del Ebro, al norte de la provincia de Zaragoza (España), contando con una superficie regable de 15.498 ha. Esta zona fue transformada por el Estado a mediados del siglo XX.

El clima es semiárido, con una evapotranspiración de referencia (Allen et al., 1998) media anual de 1.084 mm y una precipitación de 419 mm, según la serie 1965-1994 de la Estación del Instituto Nacional de Meteorología localizada en Santa Anastasia. En la zona se

distinguen dos grupos de suelos (Lecina et al., 2005): 1). Suelos de plataformas residuales poco profundos, con presencia de costra calcárea y elevados contenidos en gravas, con texturas francas y una capacidad de retención de agua disponible (CRAD) media de 65 mm; 2) Suelos de los fondos aluviales, los cuales presentan una profundidad superior a un metro, con texturas franco arenosas y franco arcillosas, con escasa pedregosidad y CRAD media de 180 mm.

El sistema de distribución de agua es por gravedad, mediante una red de acequias revestidas en hormigón que parten del Canal de Bardenas, también revestido. El agua se distribuye por turnos durante 24 h al día a lo largo de más de un centenar de acequias secundarias repartidas en 11 sectores. Para este estudio se ha seleccionado el Sector XIX, que cuenta con 2.553 ha que se riegan por gravedad, de las que 1.603 ha presentan suelos de plataforma y el resto de fondo, siendo el caudal medio de riego de 140 l s^{-1} . La red de desagües permite la evacuación de las aguas de escorrentía superficial y de percolación hacia los ríos Riguel y Arba de Luesia. Los servicios de operación y mantenimiento son cobrados por la CRV sobre superficie regable y volumen de agua usada mediante una fórmula binómica.

El tamaño medio de las parcelas de un mismo propietario es de 11,5 ha, aunque únicamente el 28% de las mismas tiene una superficie superior. Los cultivos que predominan son los extensivos, principalmente alfalfa y maíz, siendo la orientación productiva de las explotaciones mayoritariamente agraria.

2.2. La zona regable del *Bear River Irrigation Project*

La zona regable del *Bear River Irrigation Project* (BRIP) se encuentra situada al norte del Estado de Utah, localizado al oeste de los EEUU, y cuenta con una superficie regable de 26.856 ha. Esta zona fue desarrollada por una compañía azucarera al inicio del siglo XX, y actualmente es gestionada por la *Bear River Canal Company* (BRCC). La zona de estudio seleccionada para este estudio tiene una superficie regable por gravedad de 1.213 ha, localizándose al norte de la BRIP.

El clima es semiárido, con un marcado carácter continental. La evapotranspiración de referencia (Allen et al., 1998) media anual es de 1.368 mm y la precipitación de 413 mm según los datos de la serie 1989-2008 de la Estación del *National Weather Service* de los EEUU situada en Tremonton. En la zona de estudio se distinguen dos unidades de suelos (SSS-NRCS, 2008; Lecina et al., 2009): 1) Suelos *Parleys* (PdA), caracterizados por su gran profundidad, encontrarse libres de gravas y presentar una textura franca con una CRAD media de 204 mm; 2) Suelos *Fielding* (Fd), de similares características, aunque con una textura franco-limosa y una CRAD de 228 mm. La superficie ocupada por cada tipo de suelo es de 530 ha y 683 ha, respectivamente.

La red de distribución de agua consta de una red de acequias en tierra que parte de 24 compuertas situadas en el Canal *Westside*, también sin revestir. El caudal medio de riego es de 84 l s^{-1} . El sistema de distribución está organizado en turnos con una jornada de riego de 24 h. La red de drenaje de la zona vierte los retornos de riego al río *Malad*, en un tramo situado a 25 km del Gran Lago Salado. Los servicios de operación y mantenimiento son cobrados sobre la superficie con derecho a riego por la BRCC.

La superficie media de las parcelas de la zona de estudio es de 9,3 ha. Las explotaciones agrarias están orientadas a la ganadería, por lo que la actividad agraria, que produce principalmente alfalfa y maíz, es subsidiaria de esta actividad principal.

3. Material y métodos

La primera fase de esta metodología para apoyar la toma de decisiones sobre el establecimiento de cupos de agua consistió en identificar las prácticas de riego y distribución de agua que optimizasen el uso de los recursos hídricos. Para ello se desarrollaron una serie de evaluaciones de riego en parcela según la metodología de Merriam y Keller (1978), una campaña de muestreo de suelos, y una campaña de entrevistas con regantes y responsables de la distribución del agua en sendas zonas regables. Una simulación de los flujos de agua de ambas zonas fue realizada mediante el modelo Ador-simulación (Lecina y Playán, 2006) a partir de los datos recopilados en campo. Este modelo reproduce la interacción entre el agua de riego, las redes de distribución y de drenaje, la producción agraria y el medio ambiente. Para ello consta de cinco submodelos que simulan de forma integrada el riego en parcela, el crecimiento de los cultivos, el balance hidrosalino, los flujos de agua en las redes y la toma de decisiones en la distribución y aplicación del agua.

En la simulación de las dos zonas de estudio se consideraron tres escenarios de gestión:

- Escenario actual: reproduce los flujos de agua en las condiciones de gestión determinadas durante la fase de trabajo de campo.
- Escenario 1: simula las zonas regables optimizando la gestión del riego en parcela.
- Escenario 2: reproduce los flujos de agua optimizando tanto la gestión del riego en parcela como la de la distribución del agua en la red de acequias.

El balance de agua a escala de zona de estudio, así como una serie de indicadores hidrológicos, de riego en parcela y productivos fueron determinados en cada escenario (Burt et al., 1997; Molden et al., 1998; Molden y Sakthivadivel, 1999). Los precios medios de los cultivos fueron tomados de estadísticas oficiales de los años 2003-2004. La simulación se realizó para un año medio de necesidades hídricas netas de los cultivos, según la serie histórica disponible. El patrón de cultivos considerado fue el correspondiente al de la rotación estándar de cultivos, que en ambas zonas fue de un 50% de alfalfa y hierba, un

25% de maíz y un 25% de cereales de invierno con una duración media de ocho años. Para esta fase se consideraron los resultados obtenidos en los trabajos realizados por Lecina et al. (2005) y Lecina et al. (2009) en ambas zonas regables.

La segunda fase consistió en cuantificar el efecto que sobre el uso del agua y la producción de los cultivos tienen la variabilidad de la meteorología, de los suelos, del patrón de cultivos, de las infraestructuras y de la propia gestión. Este efecto debe considerarse al establecer cupos de agua para que los mismos sean útiles en diversas condiciones de operación de las zonas regables. Con este fin se simuló una serie de 20 campañas de riego, cuyos datos meteorológicos correspondieron a los registrados por las estaciones meteorológicas anteriormente mencionadas en cada zona de estudio. La simulación de esta serie de campañas se repitió para cada escenario de gestión, considerando el patrón medio de cultivos antes indicado y un patrón intensificado compuesto por un 50% de alfalfa, un 40% de maíz y un 10% de cereal de invierno. De esta forma se consideró el efecto que sobre la producción agraria, y por tanto, sobre el uso del agua, pueden tener las variaciones de los precios agrarios en función de la coyuntura de mercados nacional e internacional.

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos en las series de simulaciones se determinó el impacto que sobre la producción agraria, y el uso y el consumo del agua tienen diferentes cupos bajo las condiciones antes indicadas. Los resultados obtenidos constituyen la información que esta metodología aporta para el posterior proceso de toma de decisiones sobre el establecimiento de cupos.

4. Resultados y discusión

4.1. La Comunidad de Regantes V del Canal de Bardenas

La Tabla 1 muestra los resultados obtenidos de la simulación de los tres escenarios de gestión para un año medio en ambas zonas de estudio. En la CRV, la eficiencia de riego (ER) y el volumen de agua usado en parcela alcanzan en la situación actual valores medios del 45% y de $8.800 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. No obstante, estos indicadores difieren sensiblemente entre ambos tipos de suelo. En suelos de plataforma, donde la CRAD es pequeña, la eficiencia media es del 37%, mientras que la demanda media de agua es de $6.600 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. En los suelos de fondo, estas variables presentan valores del 69% y de $10.100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. La fracción consuntiva a escala de comunidad alcanza un valor de 0.51. Los retornos de riego son reutilizables debido a la calidad de los mismos y al verse en tramos fluviales del valle medio del Ebro, situados a más de 250 km del Mar Mediterráneo. El rendimiento de los cultivos es un 17% inferior a su potencial, debido principalmente a la escasa CRAD del suelo, a la capacidad de distribución de agua de la red y a la gestión del sistema. La productividad por unidad de superficie es de 1.177 € ha^{-1} (251 € ha^{-1} inferior a su potencial

considerando rendimientos máximos), y la productividad del agua de riego usada de 0,134 € m⁻³.

Tabla 1. Balance e indicadores hidrológicos, de riego en parcela y productivos para una campaña de riego media y tres escenarios de gestión en la CRV y en la BRIP

	CRV			BRIP		
	Escenario actual	Escenario 1	Escenario 2	Escenario actual	Escenario 1	Escenario 2
BALANCE						
Entradas (Mm ³)	28,09	23,36	25,41	15,13	11,68	12,29
Riego	22,48	17,76	19,81	11,48	7,99	9,04
Precipitación	5,60	5,60	5,60	3,03	3,03	3,03
Ascenso capilar	0,00	0,00	0,00	0,63	0,66	0,22
Salidas (Mm ³)	28,81	24,09	26,28	15,40	11,99	12,66
Agua consumida	14,55	14,67	15,32	9,64	9,64	9,77
Evapotransp. cultivos	14,55	14,67	15,32	9,64	9,64	9,77
Escorr./Perc. no recuperable	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Agua no consumida	14,26	9,43	10,96	5,76	2,35	2,89
Escorr./Perc. recuperable	14,26	9,43	10,96	5,76	2,35	2,89
Variación agua en suelo (Mm ³)	-0,71	-0,75	-0,88	-0,26	-0,30	-0,36
INDICADORES						
Fración consuntiva (m ³ m ⁻³)	0,51	0,61	0,58	0,65	0,85	0,79
Eficiencia de riego (%)	45	57	54	59	83	80
Reducción de la evapotr. (%)	15	15	11	2	2	1
Reducción del rendimiento (%)	17	16	12	4	3	3
Reducción valor producc. (%)	18	17	13	4	3	2
Product. ud. superf. (UM ha ⁻¹)*	1.177	1.187	1.244	1.288	1.300	1.313
Product. agua usada (UM m ⁻³)*	0,134	0,171	0,160	0,136	0,197	0,176

(*) UM: unidades monetarias en € en la CRV y en \$ en la BRIP

La simulación del escenario 1 de mejora de gestión de la aplicación de agua de riego mostró que es posible mejorar la ER y la productividad mediante una reducción media del tiempo de corte del riego del 25%. En el escenario actual, este tiempo medio de riego es de 2,7 h ha⁻¹. La mejora de estos indicadores es discreta debido principalmente a la limitación que supone la escasa CRAD del suelo. No obstante, el volumen de agua de riego usado se redujo un 21 %, manteniéndose prácticamente constante el consumo de agua.

Finalmente, en la simulación del escenario 2 se consideró una disminución del intervalo entre riegos, aprovechando la disminución de la dosis de agua aplicada que supone la reducción del tiempo de corte. En la situación actual, este intervalo se sitúa entre 12-14 días, lo que induce un notable estrés hídrico en los cultivos. Esta mejora en la distribución de agua añadida a la de la aplicación del riego incrementa la productividad por unidad de superficie y del agua usada un 6 % y un 20 %, respectivamente. En este caso la reducción del uso del agua es del 12 %, incrementándose ligeramente el consumo.

El análisis de la variabilidad de diversos factores que afectan al uso del agua y la producción de los cultivos mostró los siguientes resultados:

- Meteorología: la Figura 1 muestra que este factor determina una amplitud de $4.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ en el intervalo de demanda de agua, siendo los límites de dicho intervalo y la distribución anual dentro de este intervalo diferentes para cada escenario de gestión. La amplitud en el caso de la productividad por unidad de superficie es de 75 € ha^{-1} .

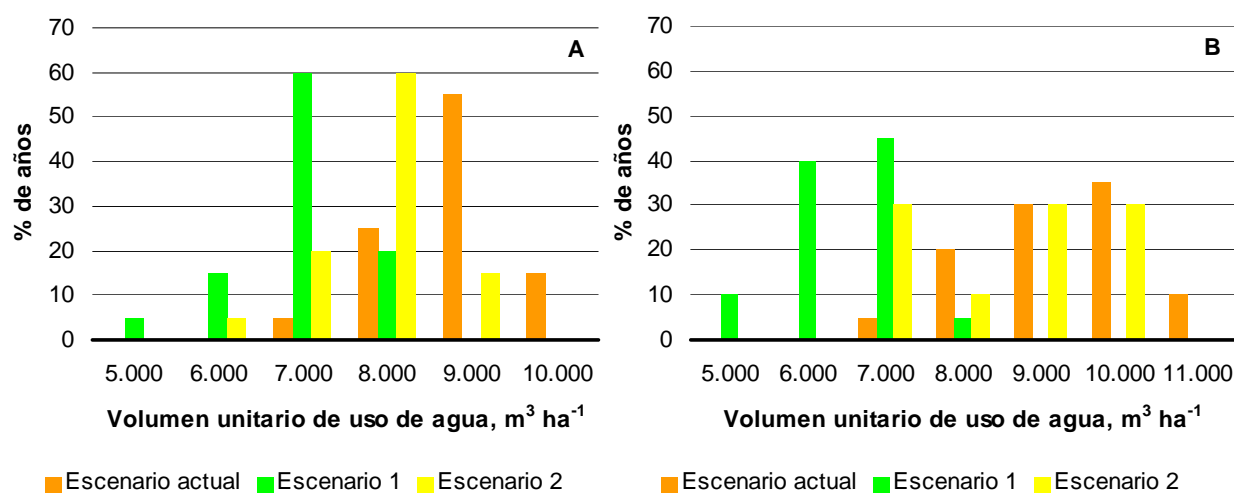


Figura 1. Distribución por volúmenes unitarios de uso de agua de la serie de 20 campañas de riego simuladas en la CRV (A) y en la BRIP (B) para cada escenario de gestión

- Patrón de cultivos: este factor supone un incremento de $1.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ en el intervalo de demanda de agua, manteniéndose la misma amplitud, considerando un patrón medio y otro intensificado en cada uno de los escenarios de gestión. En el caso de la productividad por unidad de superficie la amplitud del intervalo pasa a ser de 250 € ha^{-1} , incrementándose el límite máximo del mismo en 150 € ha^{-1} .
- Suelos: las diferentes propiedades físicas de los suelos de la CRV suponen una diferencia en la demanda de agua de entre $2.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ y $4.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ en cada uno de los escenarios de gestión, dependiendo de las condiciones meteorológicas del año simulado. La diferencia media en productividad por unidad de superficie oscila entre 425 € ha^{-1} en maíz, y 125 € ha^{-1} en alfalfa y cereal de invierno, con un coeficiente de variación interanual entre el 15 % (maíz y alfalfa) y el 30 % (cereal de invierno).
- Gestión e infraestructuras: además del efecto de los diferentes escenarios de gestión a escala de zona de estudio, también es necesario determinar la variabilidad interparcelar que inducen la gestión y la capacidad de distribución de agua de cada tramo de red. Esta variabilidad, que se suma a la de los suelos, determina cómo afecta a las diferentes parcelas un mismo cupo de agua asignado a toda la comunidad. El coeficiente de variación (CV) del uso del agua alcanza valores de hasta el 25 % en suelos de plataforma y de hasta el 30 % en suelos de fondo, siendo mayores en el caso de los cereales de invierno, y para el escenario actual. Respecto a la productividad por unidad de superficie, el CV máximo es del 5 % en suelos de plataforma, siendo mayores en el

maíz debido a su mayor sensibilidad al estrés hídrico. En suelos de fondo el CV máximo es del 15 %.

La Figura 2 muestra la evolución de la productividad por unidad de superficie, como media de las 20 campañas simuladas, en función de diferentes cupos de agua y escenarios de gestión. Para el escenario actual y el escenario 1, únicamente se muestra un punto, correspondiente al valor de máxima demanda de la serie, dado que en dichos escenarios el intervalo de riego en suelos de plataforma no se puede incrementar sin peligrar la supervivencia del cultivo, dada la escasa CRAD. En el caso del escenario 2 se pueden considerar tres cupos antes de llegar a este límite. El efecto de considerar cupos inferiores al valor máximo de demanda de la serie únicamente tiene un cierto efecto (66 € ha^{-1}) en el caso del cupo mínimo ($7.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), lo que lo igualaría a la productividad media del escenario 1. No obstante, estos valores son medios, pudiéndose encontrar diferencias de más de 100 € ha^{-1} respecto a la demanda sin cupos en determinados años, siendo todavía mayores si se considera la variabilidad interparcelar antes indicada.

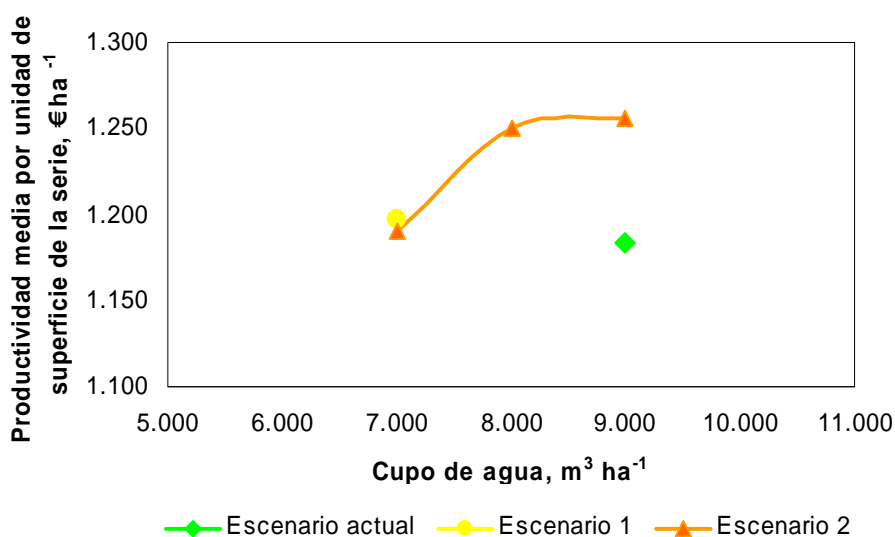


Figura 2. Productividad media por unidad de superficie de la serie de 20 años simulada por cupo de agua y escenario de gestión en la CRV

Se comprueba por tanto que el establecimiento de cupos puede incentivar la mejora de la gestión para reducir sensiblemente la demanda de agua sin merma de la producción actual, o incluso incrementándola ligeramente. Por el contrario, el consumo de agua, en forma de evapotranspiración, apenas variaría, o se incrementaría ligeramente, dada la capacidad de reuso de los retornos de riego. Por este motivo, el establecimiento de cupos tendría escaso impacto sobre la disponibilidad del agua a escala de cuenca, aunque podría contribuir a mejorar su calidad al disminuir la fracción de percolación. El interés de la adopción de estos cupos recaería por tanto en la propia comunidad, al permitir conservar agua que podría servir para atenuar el impacto negativo de la escasez de agua en épocas de sequía. Por

tanto, el establecimiento del cupo a fijar dependerá, entre otros factores, de la capacidad de regulación de agua disponible, de la posibilidad de reutilizar retornos de riego de otras zonas situadas aguas arriba, de la recurrencia e intensidad de los periodos de sequía, y del esfuerzo a realizar para adoptarlos.

En este sentido, la aplicación de esta estrategia de limitación de demanda de agua requeriría, de forma previa, una adecuada formación de los agricultores y de los responsables de la gestión de la distribución del agua, y una mayor capacidad de servicio de la comunidad. Por otra parte, la variabilidad interparcelar inducida principalmente por los suelos y las infraestructuras podría generar problemas de inequidad entre explotaciones, en función de la localización de sus parcelas. Por este mismo motivo, los resultados de uso del agua y productividad podrían ser menores respecto a los obtenidos en este trabajo, en el que no se ha contemplado la distribución espacial de las explotaciones, sino de las parcelas. Aunque actualmente se aplican cupos comunes a toda la CRV en campañas con restricciones de agua, los cupos que se plantean en este trabajo se aplicarían de forma continua.

4.2. La zona regable del *Bear River Irrigation Project*

En la BRIP, la EA y el volumen de agua usado en parcela presentan valores del 59 % y $9.500 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ en el escenario actual, no presentando diferencias notables entre tipos de suelo (Tabla 1). La fracción consuntiva es de 0,65, reaprovechándose los retornos de riego en el refugio de aves acuáticas existente en la desembocadura del río *Bear* en el Gran Lago Salado (Utah Division of Water Resources, 2004). Una parte del agua infiltrada desde el canal y la red de acequias, así como de la percolada desde las parcelas, es reutilizada en la propia zona de estudio por ascenso capilar, dado que la capa freática se encuentra próxima a la zona de raíces. El rendimiento de los cultivos es un 5 % inferior a su potencial debido principalmente a la capacidad de distribución de agua de las acequias y a la gestión del sistema. La productividad por unidad de superficie es de $1.288 \text{ \$ ha}^{-1}$ ($49 \text{ \$ ha}^{-1}$ inferior al potencial) y la del agua usada de $0,136 \text{ \$ m}^{-3}$.

La aplicación del agua de riego puede optimizarse reduciendo el tiempo medio de corte de $6,5 \text{ h ha}^{-1}$ a $4,2 \text{ h ha}^{-1}$ (escenario 1). Esta reducción implica que la EA media alcance valores en torno al 80 % y que el uso del agua disminuya un 30 %. Sin embargo, la productividad por unidad de superficie apenas varía, dado el escaso estrés hídrico al que se somete a los cultivos, mientras que la productividad del agua se incrementa un 45 %.

El escenario 2, en el que se incrementa la frecuencia de riego, apenas supone un ligero aumento de la productividad por unidad de superficie, alcanzando prácticamente su valor potencial. En este caso la disminución del uso del agua es de un 21 %, por lo que el aumento de la productividad del agua es del 29 % respecto al escenario actual.

Debe tenerse en cuenta en la interpretación de estos resultados que en los escenarios 1 y 2 de mejora de la gestión, se ha estimado que el nivel de la capa freática permanece a una profundidad similar que la del escenario actual. Estudios adicionales deben ser llevados a cabo para comprobar esta hipótesis.

El análisis de la variabilidad de los factores que afectan al uso del agua y la producción de los cultivos mostró los siguientes resultados:

- Meteorología: este factor determina una amplitud de $5.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ en el intervalo de demanda de agua en el escenario actual, y de $4.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ en el resto de escenarios (Figura 1). La amplitud en el caso de la productividad por unidad de superficie varía entre $75 \text{ \$ ha}^{-1}$ y $50 \text{ \$ ha}^{-1}$.
- Patrón de cultivos: este factor supone un incremento de $1.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ en el intervalo de demanda de agua, reduciéndose la amplitud en el mismo valor. En el caso de la productividad por unidad de superficie la amplitud del intervalo se mantiene, incrementándose el límite máximo del mismo entre $150 \text{ \$ ha}^{-1}$ (escenario actual) y $100 \text{ \$ ha}^{-1}$ (escenarios 1 y 2).
- Suelos: la similitud en las propiedades físicas de los dos tipos de suelo supone que apenas haya diferencias en el uso del agua y en la productividad entre ambos.
- Gestión e infraestructuras: el coeficiente de variación (CV) del uso del agua alcanza valores de hasta el 20 %, siendo mayores en el caso de los cereales de invierno, y para el escenario actual. El CV máximo de la productividad por unidad de superficie es del 5 %, siendo mayor en maíz. La elevada CRAD del suelo y la reutilización del agua percolada por ascenso capilar influyen en esta pequeña variabilidad.

La elevada CRAD de los suelos de esta zona permite la posibilidad de asignar diferentes cupos de agua en cada uno de los escenarios de gestión (Figura 3). La respuesta de la productividad media del suelo a estos cupos es baja. En efecto, las máximas disminuciones de la productividad en cada escenario varían entre $34 \text{ \$ ha}^{-1}$ y $105 \text{ \$ ha}^{-1}$ como media interanual respecto a la inexistencia de cupos. Estas variaciones pueden ser ligeramente mayores a escala interparcelar. Asimismo, y debido a todo ello, se pueden adoptar cupos de agua que permitan la posibilidad de intensificar el patrón de cultivos sin suponer una merma sensible de la productividad en un número importante de años.

Estos resultados indican que existe una gran diversidad de opciones en la BRIP para establecer cupos que contribuyan a conservar agua. Además, existe una reducida variabilidad interparcelar en cuanto a productividad por unidad de superficie, lo que facilitaría su implantación. Sin embargo, en esta zona no se realiza actualmente un control del volumen de agua usada en cada parcela, por lo que la implantación de cupos requeriría un esfuerzo notable por parte de la BRCC.

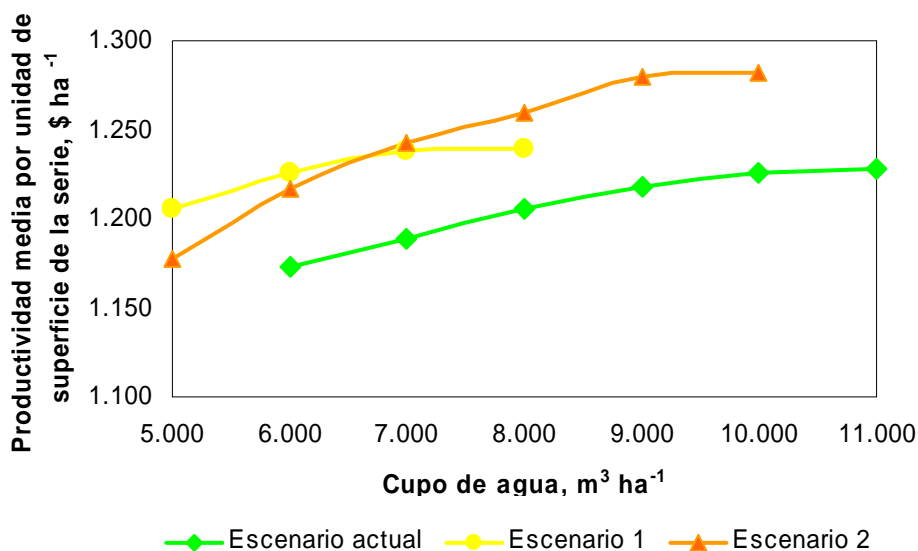


Figura 3. Productividad media por unidad de superficie de la serie de 20 años simulada por cupo de agua y escenario de gestión en la BRIP

5. Conclusiones

1. El establecimiento de cupos puede contribuir a limitar el volumen de uso del agua en aquellas zonas en las que la gestión del agua pueda mejorarse, o en las que se pretenda incentivar el cambio de tecnología de riego.
2. La aplicación de cupos puede producir inequidades entre las explotaciones como consecuencia de la variabilidad de sus suelos y de sus infraestructuras. Esta desigualdad puede suponer una dificultad para poder adoptar esta estrategia de gestión de la demanda, particularmente en zonas antiguas con condiciones poco apropiadas a la técnica de riego utilizada.
3. La utilidad del establecimiento de cupos depende de múltiples factores ajenos a la zona regable que condicionan el aprovechamiento efectivo del volumen de agua que potencialmente puede conservarse.
4. Cuando el establecimiento de los cupos de agua apenas afecta al consumo de agua, sino únicamente al volumen de uso, los principales beneficiarios de esta estrategia son las propias zonas regables en las que se aplica.

6. Agradecimientos

El contrato postdoctoral de S. Lecina fue financiado por el Ministerio de Educación del Gobierno de España a través de la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología.

7. Referencias

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper no. 56. FAO. Rome, Italy. 300 pp.

Berbel, J., Gómez-Limón, J. A. 2000. The impact of water-pricing policy in Spain: an analysis of three irrigated areas. *Agricultural Water Management*, 43(2), 219-238.

Burt, C.M., Clemmens, A.J., Strelkoff, T.S., Solomon, K.H., Bliesner, R.D., Hardy, L.A., Howell, T.A., Eisenhauer, D.E. 1997. Irrigation performance measures: Efficiency and uniformity. *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 123(6), 423-442.

Clemmens, A. J., Allen, R. G., Burt, C. M. 2008. Technical concepts related to conservation of irrigation and rainwater in agricultural systems. *Water Resources Research* 44, 16 pp.

Cornish, G., Bosworth, B., Perry, C., Burke, J. 2004. Water charging in irrigated agriculture. An analysis of international experience. FAO Water Reports 28. HR Wallingford, FAO. Roma, Italia. 82 pp.

Hellegers, P., Perry, C. J. 2006. Can irrigation water use be guided by market forces? Theory and practice. *International Journal of Water Resources Development*, 22(1), 79-86.

Lecina, S., Playán, E., Isidoro, D., Dechmi, F., Causapé, J., Faci, J.M. 2005. Irrigation evaluation and simulation at the irrigation district V of Bardenas (Spain). *Agric. Wat. Manage.* 73, 223-245.

Lecina, S., Playán, E. 2006. A model for the simulation of water flows in irrigation districts: I. Description. *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE, 132(4):310-321.

Lecina, S., Neale, C.M.U., Merkley, G.P., dos Santos, C.A.C. 2009. Increasing field work productivity in irrigation evaluation processes through the use of combined irrigation models. *Proceedings of World Environmental and Water Resources Congress 2009. Environmental and Water Resources Institute-ASCE.* 17-21 de mayo. Kansas City (MO), EEUU.

Merriam, J.L., Keller, J. 1978. *Farm irrigation system evaluation: A guide for management.* Utah State University. Logan, UT, EEUU. 271 pp.

Molden, D.J., Sakthivadivel, R., Perry, J., Friture, C., Kloezen W.H. 1998. Indicators for comparing performance of irrigated agricultural systems. *Research Report 20, International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka.* 26 pp.

Molden, D., Sakthivadivel, R. 1999. Water accounting to assess use and productivity of water. *International Journal of Water Resources Development* 15(1/2), 55-71.

Playán, E., Mateos, L. 2006. Modernization and optimization of irrigation systems to increase water productivity. *Agric. Wat. Manage.* 80, 100-116.

SSS-NRCS. 2008. Soil Survey Geographic (SSURGO) Database for Box Elder, Utah. Soil Survey Staff, Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture. Disponible en <http://soildatamart.nrcs.usda.gov> Accedido en junio de 2008.

Utah Division of Water Resources. 2004. Bear River Basin. Planning for the future. Utah State Water Plan. Division of Water Resources. Salt Lake City, UT. EEUU. 88 pp.