

Nexo agua-energía: optimización energética en sistemas de distribución. Aplicación “Postrasvase Júcar-Vinalopó”, España

• Modesto Pérez-Sánchez • Francisco Javier Sánchez-Romero •
• P. Amparo López-Jiménez* •

Universitat Politècnica de València, España

*Autor para correspondencia

DOI: 10.24850/j-tyca-2017-04-02

Resumen

Pérez-Sánchez, M., Sánchez-Romero, F. J., & López-Jiménez, P. A. (julio-agosto, 2017). Nexo agua-energía: optimización energética en sistemas de distribución. Aplicación “Postrasvase Júcar-Vinalopó”, España. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(4), 19-36.

En ocasiones, la realización de transferencias de volúmenes de agua entre cuencas es la única solución al déficit hídrico para algunas zonas agrícolas. Tal es el caso del mediterráneo español, concretamente el sur de la provincia de Alicante. De manera histórica, esta área ha presentado un balance hídrico deficitario entre necesidades de riego y recursos, provocando la sobreexplotación de sus acuíferos. Para paliar este impacto medioambiental se articuló una transferencia de volúmenes entre las cuencas de los ríos Júcar y Vinalopó. Un sistema hidráulico a presión fue el encargado de trasvasar agua entre cuencas y distribuir las a las superficies de regadío. En el presente artículo se describe la metodología utilizada para optimizar el sistema agua-energía, basado en *Epanet*, para que una vez calibrado se utilice como herramienta de explotación del sistema. Dicho modelo permite analizar la distribución de volúmenes y caudales en función de la demanda agrícola existente en cada balsa receptora. Unido a la distribución hidráulica se realiza un estudio profundo de las posibles relaciones hidroenergéticas en el sistema conjunto, llegando a obtener un valor máximo de energía recuperable teórica de 18 418 MWh/año. Así, se determina la viabilidad de aprovechar saltos hidráulicos para aumentar la eficiencia conjunta en la distribución.

Palabras clave: nexo agua-energía, energía recuperable, Postrasvase Júcar-Vinalopó.

Introducción

La zona mediterránea española, concretamente el sur de la provincia de Alicante, donde se engloban las comarcas Alto Vinalopó, Medio Vinalopó, Bajo

Abstract

Pérez-Sánchez, M., Sánchez-Romero, F. J., & López-Jiménez, P. A. (July-August, 2017). Water-Energy nexus. Energy optimization in water distribution system. Case study ‘Postrasvase Júcar-Vinalopó’, Spain. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 8(4), 19-36.

Nowadays, making interbasin transfers of water is the only solution to the water shortage for some agricultural areas. This is the case of the Spanish Mediterranean region, namely the southern province of Alicante. This area has historically presented a water balance deficit between irrigation needs and resources, resulting in overexploitation of aquifers. To alleviate this environmental impact, some water volumes between the basin of the Júcar and Vinalopó rivers were transferred. A hydraulic pressure system was responsible for transferring water between basins and distributing it to the irrigated areas. In this article, a methodology used to optimize water-energy system is described, developing a calibrated model using *Epanet* as a tool operating system. This model allows managers to analyze the distribution of volumes and flow dependence on the existing agricultural demand in each receiver reservoir. Attached to the hydraulic distribution, a thorough study of the possible hydro-energy relations in the whole system is carried out, obtaining a maximum theoretical value of recoverable energy 18 418 MWh/year. This way, the feasibility of using hydraulic heads is determined so to increase overall efficiency in the whole distribution system.

Keywords: Water-energy nexus, recoverable energy, Júcar-Vinalopó Post-transfer.

Recibido: 30/03/2016

Aceptado: 13/03/2017

Vinalopó y L’Alacantí (figura 1) se caracteriza por tener unas condiciones climáticas muy favorables para el desarrollo de cultivos hortícolas y cultivos leñosos, como uva de vinificación, uva de mesa y granada, entre otros (Murillo-Díaz *et al.*, 2009).

La benevolencia de las condiciones climáticas de temperatura para la producción se vuelve en contra en el aspecto pluviométrico, presentando largos periodos sin lluvia. Este hecho ha provocado que de manera histórica prácticamente la totalidad de los cultivos haya sido de regadío, apoyados por los recursos hídricos presentes en la zona, en especial fuentes y acuíferos subterráneos (Bru-Ronda, 1993).

La sobreexplotación de acuíferos de esta zona particular del Mediterráneo español se hizo patente a finales del siglo XX, con descensos muy importantes de los niveles piezométricos e incluso la salinización de algunos de ellos por intrusión marina (Ramón-Morte, Olcina-Cantos, & Rico-Amorós, 1990). Para solventar esta situación, desde la Administración se buscó mejorar la eficiencia hidráulica en los sistemas de distribución, a través del plan de modernización de regadíos, desarrollado por el Ministerio de Agricultura y Medio Ambiente Español (IDAE, 2005), junto con el apoyo del gobierno autonómico de la Generalitat Valenciana, con ayudas procedentes de fondos europeos.

De forma paralela, e incluso antes de acometer la modernización de regadíos, el Plan de Cuenca del Júcar y el Plan Hidrológico Nacional mostraban la necesidad de realizar transferencias entre las cuencas del río Júcar y la cuenca del río Vinalopó (Espín, 1997). En ambos planes, esta transferencia se fijó en 80 hm³/año desde el río Júcar hasta la cuenca del río Vinalopó, con el objetivo de paliar el déficit hídrico de 52 399 ha de regadío, así como el abastecimiento urbano en los municipios afectados.

La regulación de las redes de canales de riego es un problema ya descrito por la bibliografía (De León-Mojarro, Verdier, Piquereau, Ruiz-Carmona, & Rendón-Pimentel, 2002) y en ocasiones la única solución es la transferencia de agua entre diferentes cuencas (Silva-Hidalgo, Aldama, Martín-Domínguez, & Alarcón-Herrera, 2013). En este caso, también la transferencia es la solución que se plantea. Para poder realizar este trasvase entre cuencas se ha ejecutado una conducción presurizada que presenta impulsiones encadenadas desde la cota 1.5 m en el Azud de la Marquesa (Cullera, Valencia) hasta

el tanque "El Ramblar" en la población de la Font de la Figuera (Valencia, España) a la cota 655 m; desde aquí, por gravedad, el flujo circula hasta la balsa de San Diego (Villena, Alicante, España). Esta infraestructura, que finaliza 9 km aguas abajo de San Diego, se denomina Trasvase Júcar-Vinalopó (TJV) (Abreu, Cabrera, Espert, García-Serra, & Sanz, 2012). Esta primera infraestructura contribuye a captar agua del Júcar y almacenarla en la cabecera de las comarcas del Vinalopó para poder distribuirla.

La red presurizada ramificada encargada de la distribución se denomina Postrasvase Júcar-Vinalopó (PJV) y su funcionamiento es íntegro por gravedad. Dicha red está formada por más de 140 km de conducción y se divide en una aducción principal común telescópica de diámetros 1 900-1 800-1 100-1 000 mm (de 38 km de longitud); un ramal denominado Margen Derecha (60 km), que abastece a los municipios situados en dicha margen del río Vinalopó, y un ramal denominado Margen Izquierda (42 km, que no se encuentra ejecutado), que será el encargado de suministrar caudales a los términos municipales de esta margen (figura 1). Estas conducciones derivan los caudales a las diferentes balsas de regulación existentes.

Las balsas son infraestructuras de retención de volumen de agua situadas fuera de un cauce y están delimitadas total o parcialmente por un dique de retención.

Como ya se ha citado, el TJV conlleva una impulsión escalonada en balsas de regulación de 786.75 mca desde el Azud de la Marquesa (Cullera, Valencia) hasta la arqueta del Ramblar (Font de la Figuera, Valencia). Por otro lado, desde la balsa de San Diego hasta las balsas situadas en el postrasvase Júcar-Vinalopó (situadas en los diferentes municipios de las comarcas del Alto, Medio, Bajo Vinalopó y L'Alacantí en la provincia Alicante) se trasvasa el agua por gravedad, con un desnivel geométrico entre balsas situadas en el postrasvase que puede alcanzar los 400 m (figura 2).

La modernización de los regadíos ha llevado aparejado consigo un incremento de la eficiencia hidráulica de los sistemas (Luis-de-Nicolás,

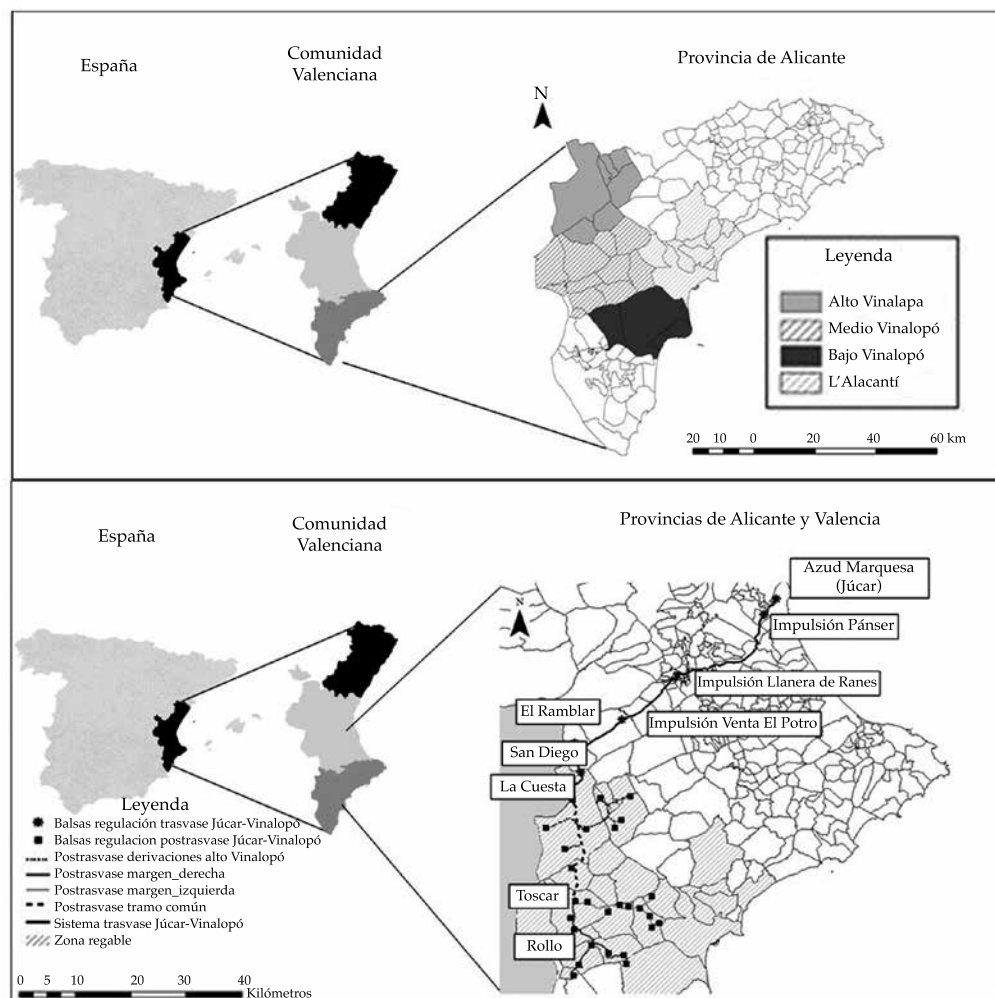


Figura 1. Comarcas beneficiadas en la cuenca del Vinalopó del trasvase Júcar-Vinalopó, trazado del trasvase y postrasvase Júcar-Vinalopó.

Laguna-Peñuelas, & Viduera, 2014), pero también un aumento del consumo de la energía para poder llevar a cabo el riego localizado (Corominas, 2010). La necesidad de aumentar y evaluar la eficiencia hidráulica y energética en las instalaciones (Cabrera, Cobacho, & Soriano, 2014; Carravetta, Del Giudice, Fecarotta, Ramos, 2012; Pardo, Manzano, Cabrera, & García-Serra, 2013; Salazar-Moreno, Rojano-Aguilar, & López-Cruz, 2014), con el objeto de reducir las emisiones de gases efecto invernadero evidencia la necesidad de sistemas de distribución de agua como sistemas multipropósito (Choulot, 2010).

El primero de sus objetivos debe ser satisfacer la demanda del sistema. El segundo objetivo será la generación de energía eléctrica y, de este modo, la reducción de la huella energética del agua (Emec, Bilge, & Seliger, 2015; Gilron, 2014); la propuesta en su conjunto debe tender hacia sistemas más sostenibles.

Objetivos del presente análisis del nexo agua-energía

Esta investigación ha considerado los estudios realizados para gestionar el Trasvase Júcar-

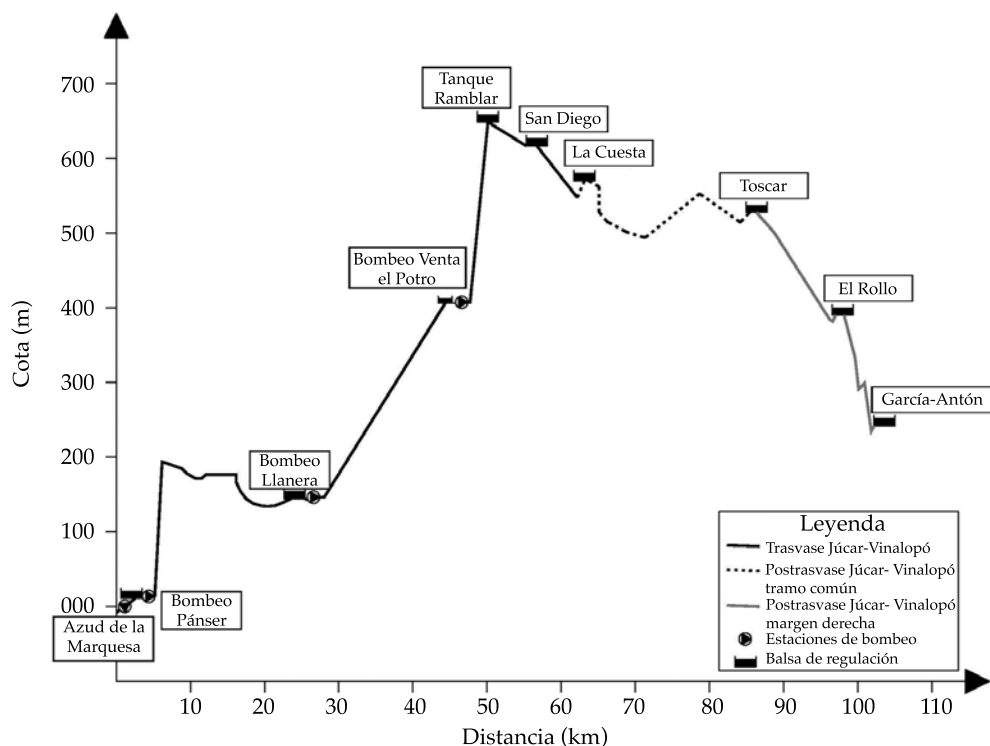


Figura 2. Esquema de perfil, trasvase y postrasvase Júcar-Vinalopó.

Vinalopó; los recursos del río Júcar en la toma del azud de la Marquesa; la capacidad de trasvasar estos recursos; el volumen de regulación, y las posibilidades de recuperación energética. Por un lado se optimizó la transferencia de volúmenes para minimizar las extracciones de aguas subterráneas. Por otro, se analizó la energía potencialmente recuperable en el sistema, teniendo en cuenta los consumos (demanda agraria y urbana) aguas abajo de la balsa de San Diego y las infraestructuras existentes para satisfacerlos. Del mismo modo, se han planteado como objetivos derivados el análisis de nuevas infraestructuras para potenciar la utilización máxima de los recursos disponibles y el estudio del aprovechamiento energético de los desniveles existentes. Así, las etapas desarrolladas en esta investigación fueron: (a) estudio de las condiciones de explotación del

Trasvase Júcar-Vinalopó; (b) modelización de las infraestructuras existentes en el postrasvase y de las demandas en la misma zona; (c) análisis de la viabilidad de las infraestructuras existentes para satisfacer las demandas, con diferentes escenarios referidos a las propias demandas y estudiando la aportación de caudales del trasvase en consonancia con sus recursos; (d) análisis y planificación de posibles mejoras en el sistema, derivadas del estudio de los puntos anteriores que puedan implantarse en un futuro al sistema hidráulico actual para poder maximizar el aprovechamiento de los recursos e infraestructuras ejecutadas; (e) estudio y análisis de la posibilidad de aprovechar desniveles piezométricos entre balsas de la infraestructura hidráulica, para generar energía eléctrica y aumentar la eficiencia energética del sistema trasvase-postrasvase Júcar-Vinalopó.

Materiales y métodos

Recolección de datos. Infraestructuras existentes de regulación, aportaciones externas y bombeos

Para poder realizar el modelo con suficiente garantía (además de la información de los documentos oficiales existentes de la Administración Estatal y Autonómica), se hizo una labor de encuesta y recogida de datos en todas las entidades de riego abastecidas por el PJV, obteniendo un total de 59 fichas identificativas de las balsas conectadas directa o indirectamente al sistema. En estas fichas se recogen los siguientes parámetros: identificación de la balsa; usuarios que abastece; comarca a la que pertenece; cotas de coronación, fondo y aliviadero; volumen útil; superficie máxima y mínima de lámina de agua; curva de cubicación de la balsa; talud interior; aportaciones externas discretizadas mensualmente por recursos hídricos procedentes de aguas regeneradas y/o aguas subterráneas; demandas actuales para comparar con las necesidades de riego determinadas teóricamente, y

superficie de riego que abastece dicha balsa. Son valores medios históricos aportados por las diferentes entidades de riego, contemplando tanto años con déficit de lluvia, así como con exceso de aportación de precipitación. Aunque existen pozos de captación sobreexplotados, como el recurso es necesario para el abastecimiento de los municipios y zona regable no existe ningún tipo de veda en dichos pozos de captación, pudiendo extraer la concesión máxima aprobada por el organismo de cuenca.

Recolección de datos. Cálculo de necesidades

Las necesidades de riego se han obtenido con base en la metodología expuesta por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (Doorembos & Pruitt, 1977). El método seguido se describe en el cuadro 1.

Las necesidades de riego fueron determinadas de acuerdo con el cultivo predominante en la zona. Estos cultivos fueron uva de vinificación (Alto y Medio Vinalopó), uva de mesa (Medio Vinalopó) y cítricos (Bajo Vinalopó). Logradas

Cuadro 1. Metodología de determinación de las necesidades de riego en función del cultivo.

Metodología del cálculo de necesidades de riego			
1. Obtención de la evapotranspiración del cultivo en riego localizado (ET_{crl}), mediante la ecuación (1):			
$ET_{crl} = ET_o K_c K_{vc} K_{ad} K_{loc}$ (1)			
Donde:			
ET_o = evapotranspiración potencial de referencia			
K_c = coeficiente de cultivo			
K_{vc} = coeficiente de variación climática = 1.2			
K_{ad} = coeficiente de advección = 1			
K_{loc} = coeficiente por riego localizado			
Para el valor de K_{loc} se toma el valor medio propuesto por cuatro autores (Pizarro, 1996)			
$K_{loc} = 1.34 \cdot A$ (2)	$K_{loc} = 0.1 + A$ (3)	$K_{loc} = A + 0.5(1 - A)$ (4)	$K_{loc} = A + 0.15(1 - A)$ (5)
Siendo A la fracción de la superficie de suelo sombreada por la cubierta vegetal a mediodía en el solsticio de verano respecto a la superficie total. En nuestro caso se adoptan los siguientes valores de A : 0.35 para uva de vinificación, 0.60 para uva de mesa y 0.70 para cítricos			
2. Obtención de la precipitación efectiva basándonos en el método propuesto por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), Servicio de Conservación de Suelos			
3. Obtención del balance hídrico mensual para la obtención de las necesidades netas de riego			
4. Obtención de las necesidades brutas de riego mediante el uso de un coeficiente de uniformidad de 0.9 e incrementándolo en un 10% por necesidades de lavado (Pizarro, 1996).			

las necesidades de riego de los cultivos, se han comparado con las dotaciones que realmente se están aplicando en la zona, con buenos resultados (encuestas realizadas a las entidades de riego), así como con las dotaciones que se contemplan para estas mismas zonas y cultivos en el Plan Hidrológico Nacional (cuadro 2). Para determinar la dotación adoptada se parte de la base de las necesidades de riego determinadas por Doorembos y Pruitt (1977), ya que como se observa en el cuadro 2, se ajustan en mayor medida a las dotaciones reales aplicadas en la zona de regadío que han sido obtenidas en las entrevistas y están recogidas en el Plan de Obras y Actuaciones para la Comunidad General del Medio Vinalopó y L'Alacantí (Ferrer, Sánchez-Romero, Torregrosa, & Zapata, 2002). Las dotaciones publicadas por el PHN presentan unos valores por exceso frente a las dotaciones reales, con excepción de la uva de mesa, la cual coincide aproximadamente con la dotación real y necesidad de riego determinada

por Doorembos y Pruitt (1977). Finalmente, las dotaciones adoptadas, distribuidas mensualmente, se aprecian en el cuadro 2. Las demandas están relacionadas con el tipo de cultivo de uva de vinificación (demanda 1; 3 461 m³/ha); uva de mesa (demanda 2; 4 333 m³/ha), y cítricos (demanda 3; 5 560 m³/ha).

Recolección de datos. Caudales circulantes por el río Júcar y conducciones

Numerosos son los estudios que existen sobre los caudales circulantes por el río Júcar, no siendo éstos totalmente concluyentes de la disponibilidad de volúmenes a trasvasar (Cabezas, 2006; Espert, 2009; López-Ortiz & Melgarejo-Moreno, 2010). Estos caudales, como es obvio, dependen del año hidrológico, así como de los caudales ecológicos o mínimos que se establezcan en el plan de cuenca. Estos estudios, en función de los caudales circulantes, marcan volúmenes trasvasables entre 25 y 60 hm³ anuales.

Cuadro 2. Comparación de dotaciones (Ferrer *et al.*, 2002) y dotaciones mensuales establecidas.

Tipo de demanda	Necesidades de riego teóricas (m ³ /ha)	Dotaciones reales (m ³ /ha)	Dotaciones PHN (m ³ /ha)	Dotaciones adoptadas (m ³ /ha)
Uva de vinificación (demanda 1)	2 029.62	2 524	4 060	3 461
Uva de mesa (demanda 2)	4 333	4 356	4 270	4 333
Cítricos (demanda 3)	6 940	6 936	4 700	5 650
Dotación adoptada mensual (m ³ /ha)				
Demanda	1	2	3	
Enero	78.0	127.5	212.5	
Febrero	97.5	158.5	265.0	
Marzo	148.0	253.0	359.5	
Abril	185.0	309.5	519.5	
Mayo	343.0	418.0	625.5	
Junio	495.0	546.5	740.0	
Julio	663.0	733.5	817.0	
Agosto	623.0	694.5	741.0	
Septiembre	411.0	460.5	548.0	
Octubre	252.5	303.0	382.5	
Noviembre	93.0	189.0	221.5	
Diciembre	72.0	139.5	218.0	
Total (m³/ha)	3 461.0	4 333.0	5 650.0	

Tales volúmenes trasvasables varían en función de las hipótesis consideradas, no sólo del caudal circulante por el río sino también del número de bombas conectadas del caudal ecológico, del caudal utilizado para riego y de los retornos del riego de los campos de cultivo de la zona. En la figura 3 se recopila la información de diversos estudios, en los cuales se tienen en cuenta los caudales circulantes en los últimos años, al igual que las detracciones.

Estos datos están basados en el aforo existente en el Azud de Huerto Mullet (Sueca, Valencia, España), del cual se le han traído los valores de consumos de las acequias existentes hasta el azud de la Marquesa (descritos en la figura 1). Para el análisis se consideran cuatro hipótesis (A, B, C y D), que fijan un porcentaje de retorno de los caudales derivados a las acequias del 25, 50, 75 y 100%, respectivamente, siendo esta última poco realista, y por lo tanto descartada para el análisis. Teniendo en cuenta estos datos, el resultado de caudales circulantes medios es el que se presenta en la figura 3. A los caudales circulantes se les debe traer el caudal ecológico y tenerse en cuenta la capacidad de bombeo instalada. La gráfica inferior de la figura 3 muestra los volúmenes trasvasables en función del caudal ecológico, considerando tres escalones de bombeo (hipótesis I: 1 bomba = 1.56 m³/s; hipótesis II: 2 bombas = 2.85 m³/s; hipótesis III: 3 bombas = 3.80 m³/s).

De igual forma que se ha procedido con las infraestructuras de regulación (balsas), se ha tenido que realizar un inventario del sistema de conducciones que forman el postrasvase y el resto de sistemas de distribución que tienen cada una de las entidades de riego que completan la red de tuberías que permite la distribución de los volúmenes trasvasados a la totalidad de las parcelas de riego de los usuarios de cada una de las entidades de riego.

Desarrollo del modelo

El modelo de optimización en la distribución de volúmenes entre los diferentes elementos de regulación ha sido desarrollado con la he-

rramienta informática *Epanet* (Rossman, 2000), la cual ha permitido reproducir la situación actual de este sistema hidráulico con el empleo de los elementos propios que presenta este *software* (depósitos, conducciones y diferentes tipos de válvulas). Este modelo ha tenido que ser complementado con el diseño de sistemas hidráulicos auxiliares que permitiesen establecer condicionantes singulares de cada uno de los elementos de regulación y/o derivación, fundamentalmente entradas por coronación en balsas y entrada de caudales procedentes de recursos propios de cada una de las entidades de riego.

Dentro del modelo numérico formado por 489 líneas y 464 nudos, se han tenido que declarar las reglas de operación en todas las balsas que regirán en un futuro la explotación del sistema. Estas leyes de funcionamiento, cuyos condicionantes de operación se recogen en la figura 4, permiten establecer, en función de los niveles en las balsas de cabecera y balsas receptoras, lo siguiente: el trasvase de aguas procedentes del Trasvase Júcar-Vinalopó; puesta en marcha de los recursos hídricos subterráneos propios, discriminando periodos horarios según tarifa eléctrica contratada, y la apertura o cierre de otros recursos propios de las entidades de riego (caudales procedentes de aguas regeneradas y/o concesiones de recursos hídricos superficiales).

El hecho de desarrollar las reglas de operación es fundamental a la hora de poder modelar la explotación del sistema hidráulico, pues la programación del modelo permite, por un lado, maximizar el volumen transferido procedente del TJV y, en función de esos volúmenes, minimizar o anular (en caso de que sea posible) el volumen extraído procedente de aguas subterráneas. Se persigue así que el PJV pueda contribuir a la recuperación de los niveles piezométricos de los acuíferos de la zona a medio y largo plazos, cumpliendo uno de los objetivos para el cual fue concebido el TJV. El desarrollo de la modelación del sistema enfocado en la explotación contribuirá a poder establecer las consignas de funcionamiento del TJV una vez

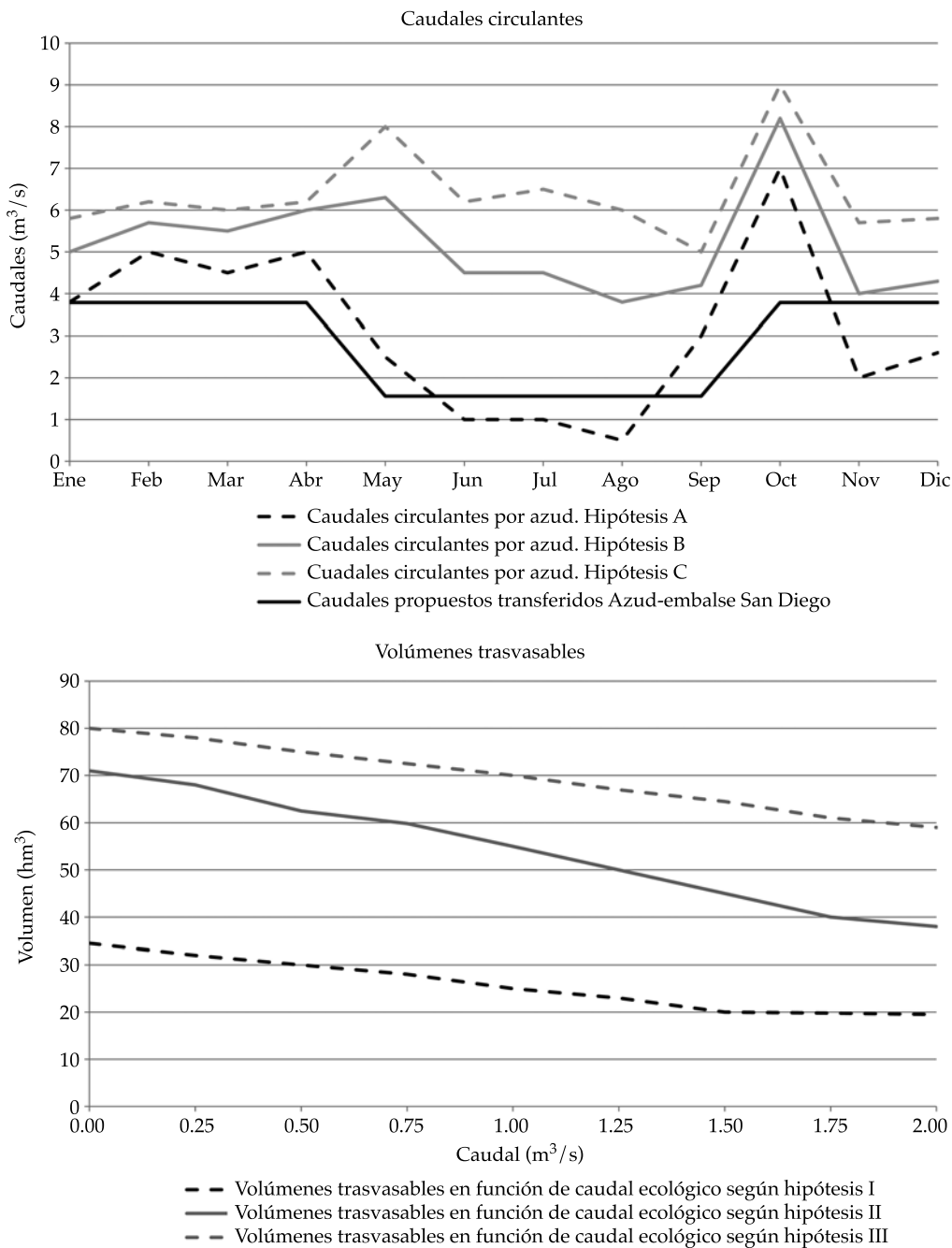
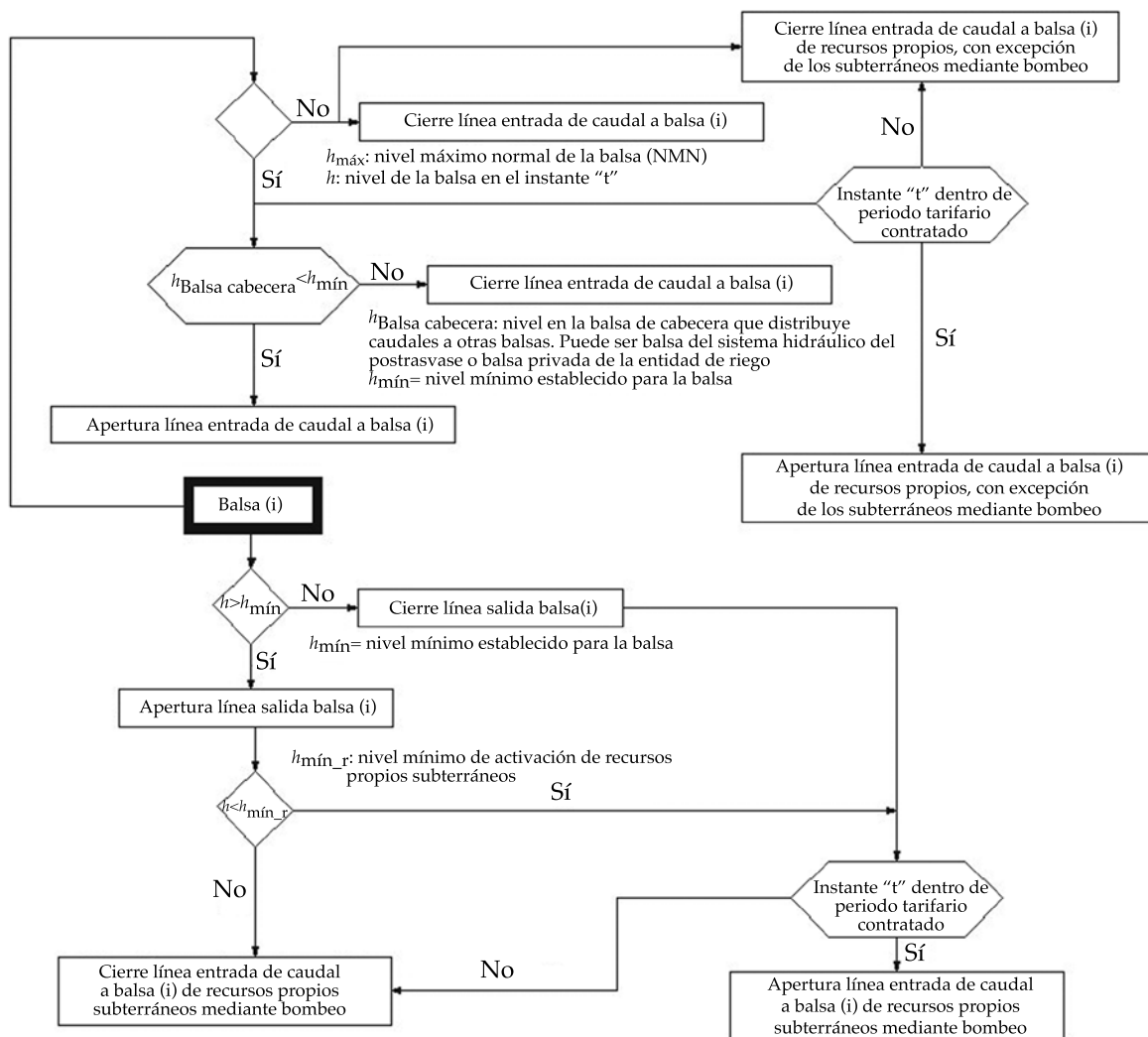


Figura 3. Caudales circulantes medios en el azud de la Marquesa según hipótesis (gráfico superior) y volumen trasvasable medio en función del caudal ecológico (gráfico inferior) (Espert, 2009; Pérez-Sánchez, García-Serra, Torregrosa, & Zapata, 2012).

que se conozcan los caudales y volúmenes demandados por el PJV.

Definidas las reglas de operación para cada una de las balsas integradas en el sistema, que establecen la entrada y salida de caudales en

ellas, procedentes de las distintas fuentes que pueden establecerse, se debe conocer la demanda de la superficie agrícola asociada con cada una de las balsas. Para definir la demanda agrícola se utiliza un nudo de consumo, al cual



Balsa (i); balsa integrada en el sistema del postrasvase o de entidad de riego que regula los volúmenes entrantes y salientes

Figura 4. Diagrama para establecer reglas de operación en las balsas integradas del sistema.

se le ha definido su curva de modulación anual. Esta curva anual discretizada por meses se obtiene realizando el producto de las necesidades mensuales (en función del tipo de demanda 1, 2 o 3 recogidas en el cuadro 2) por la superficie de riego asignada a esa balsa.

Para acometer un análisis más exhaustivo de la distribución en el sistema y poder analizar el reparto de volúmenes en función de la superfi-

cie actual en cultivo, se asigna a cada nudo una demanda base entre 0 y 1, en función del escenario a analizar. Esta asignación de demanda permitirá, en primer lugar, analizar las repercusiones en cuanto a los volúmenes entregados en cada una de las entidades, al variar la superficie de riego de explotación desde el 10% (demanda base 0.1) hasta el 100% (demanda base 1). En segundo lugar, el hecho de poder establecer la

superficie de riego exacta que abastece cada balsa permitirá tener un modelo totalmente actualizado en una futura fase de explotación, pudiendo prever los resultados de volúmenes distribuidos en situaciones a corto, medio y largo plazos, en función de la evolución de los cultivos existentes en la entidad de riego.

El hecho de tener consideradas las válvulas de regulación que actualmente existen en el sistema dentro del modelo permitirá desarrollar después un análisis de la energía potencialmente recuperable (que en la actualidad es disipada por las válvulas de regulación) para la distribución de caudales. Este análisis contemplará, por un lado, una consideración técnica que tendrá en cuenta las zonas de operación y volúmenes turbinados en función del escenario; por otro lado, se realiza un análisis preliminar económico según las directrices establecidas por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) (Castro, 2006), con el objetivo de poder establecer la viabilidad o no de un aprovechamiento hidroeléctrico.

En cuanto a aspectos económicos del presente análisis, cabe citar que Castro (2006) establece un ratio medio de inversión en centrales fluyentes de 1 500 €/kW, un coste de mantenimiento de 0.014516 €/kW (Castro, 2006) y una vida útil de la instalación de 25 años. Asimismo, los ingresos del análisis vendrán establecidos según el precio de venta de la energía en España, según Orden Ministerial ITC/3353/2010, en este caso, 8.4234 c€/kWh, no considerando discriminación horaria en el sistema, pues el objetivo principal de la red no es producir energía sino satisfacer la demanda de los usuarios. No obstante, sí se debe intentar conducir a los sistemas de distribución a sistemas del tipo "purpose system" (Choulot, 2010). En cuanto a la viabilidad del proyecto, el IDAE establece dos parámetros para estimar su viabilidad en una fase previa: el Periodo de Retorno Simple (PR), el cual relaciona la inversión y los beneficios anuales de la instalación, y el segundo parámetro, denominado Índice de Energía (IE), que vincula la inversión con la energía producida anual (kWh/año). La viabilidad de la estación

queda supeditada, según IDAE, a que el PR se sitúe entre 4 y 6 años, y el IE entre los valores de 0.4 y 0.7 €/kWh.

Resultados

Los resultados obtenidos del modelo desarrollado pueden enfocarse, por un lado, desde el punto de vista hidráulico, pues son analizados los caudales y volúmenes trasvasables, demandados y aquellos que son necesarios aportar desde el exterior como recursos propios. Por otro lado, desde un punto de vista energético, donde se podrá estimar la energía potencialmente recuperable en el sistema del Postrasvase Júcar-Vinalopó.

Resultados. Modelización hidráulica

En cuanto al resultado de la modelización hidráulica, aunque pueden darse infinidad de situaciones diferentes en cuanto a la superficie de riego que realmente está cultivada, el objetivo de este estudio no es otro que presentar los resultados que el modelo es capaz de obtener en cuanto a los volúmenes necesarios a transferir desde el Júcar (siempre que sea posible), maximizándolos de acuerdo con las reglas de operación establecidas.

Del mismo modo, pueden conocerse los volúmenes necesarios a aportar de fuentes propias del sistema, externos al Júcar-Vinalopó (aguas subterráneas y/o aguas regeneradas), para determinar si con estos recursos se es capaz de satisfacer dicha demanda. El análisis individualizado para cada una de las balsas integradas en el sistema puede establecerse a partir de la interpretación de los resultados que se engloban en la figura 5. Analizando esta figura, se puede determinar la necesidad o no de aumentar los volúmenes de regulación, determinar el déficit hídrico para esa situación, y la necesidad o no de paliar con recursos propios subterráneos, teniendo en cuenta que, a su vez, este volumen es el mínimo, según la programación de las reglas de operación. En este caso en concreto se observa que no existe problema de volumen de

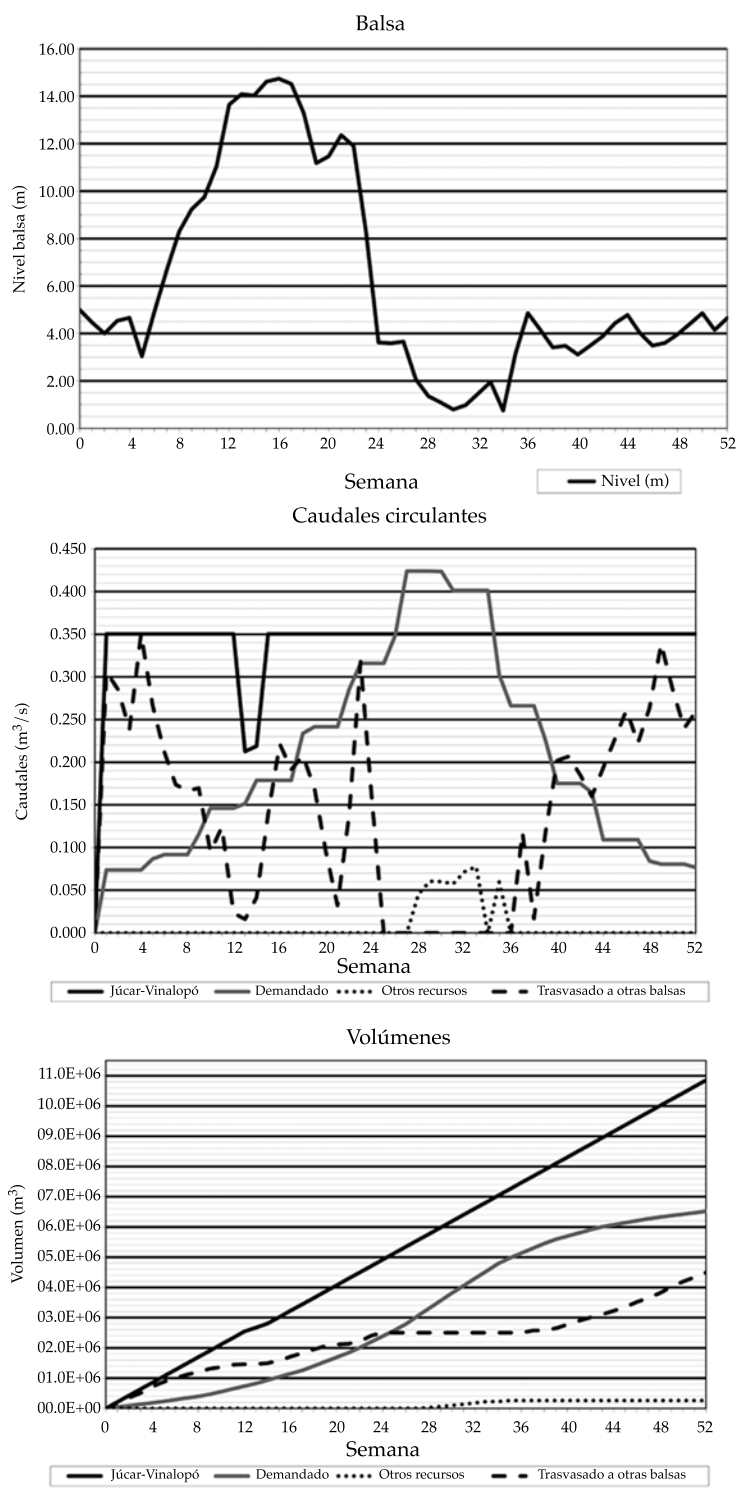


Figura 5. Ejemplo de resultados obtenidos por cada una de las balsas modeladas y escenario considerado de superficie cultivada.

regulación, pues no se alcanza el nivel máximo de la balsa (16 m). En cambio, aparecen problemas de suministro durante los meses de verano y final de año. Durante esta misma época (semanas 24 a 32) no puede existir trasvase a otras balsas conectadas a la balsa Rollo y la demanda de la superficie abastecida por esta balsa debe ser suministrada a partir de recursos propios subterráneos, siendo el volumen total aportado por estos recursos próximo a 250 000 m³/año (figura 1, volúmenes). Por tanto, en este ejemplo, el análisis desprende que el caudal entregado a la balsa debe ser superior a 0.35 m³/s, para garantizar el suministro de la demanda agraria y el trasvase a otras balsas conectadas a la mostrada en el ejemplo. Análisis similares al de la figura 1 pueden desarrollarse a partir de los datos obtenidos del modelo para cada una de las balsas que componen el sistema PJV, en cada uno de los escenarios de superficie de riego en explotación.

El análisis individualizado para cada una de las balsas puede extrapolarse y realizarse para las diferentes entidades de riego, comarcas o propio sistema: así, de los resultados, se tiene información muy importante en materia de

planificación hidráulica, que permite a entidades privadas y a la Administración desarrollar tanto infraestructuras como (lo que es más importante) planes de actuación, para que con un criterio establecido previo a un estudio pueda establecerse la explotación sostenible de las masas de agua subterráneas existente en estas comarcas. Esta información podrá determinar la necesidad o no de aumentar los volúmenes de regulación anual de las entidades de riego, determinar en qué masas de aguas subterráneas pueden reducirse sus extracciones y analizar globalmente entidades de riego pertenecientes a una misma comarca, para poder establecer interconexiones entre ellas, a fin de satisfacer en la medida de lo posible sus necesidades hídricas.

La figura 6 muestra la variación del caudal entrante, caudal demandado (considerando la variabilidad de la demanda de la red), nivel de la balsa y como potencia generada teórica en una de las balsas de regulación existentes en el Postrasvase Júcar-Vinalopó, en donde se observa cómo el caudal de entrada se mantiene constante e igual a 0.35 m³/s, como consecuencia de que se encuentra en un periodo de llenado. En este caso, la potencia generada es prácticamente

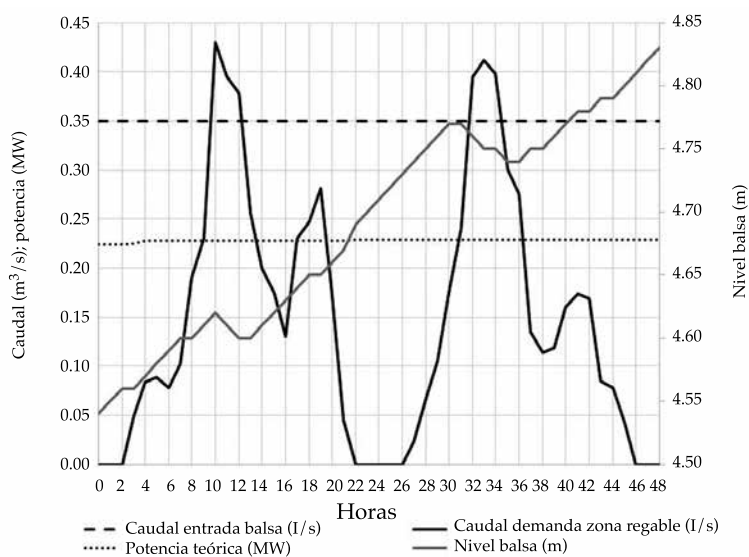


Figura 6. Ejemplo de resultados caudales, niveles y potencia generada teórica en intervalos horarios.

constante e igual a 0.225 MW, ya que los valores de la altura recuperada permanecen prácticamente constantes, variando entre 93.22 y 95.41 mca en función de los caudales distribuidos. Por el contrario, los caudales demandados por la zona regable varían entre 0 y 420 l/s, siendo el caudal medio considerado para este periodo igual a 147 l/s, correspondiéndose con el valor de la demanda media mostrada en la figura 5 entre las semanas 8 y 12.

Finalmente, el modelo hidráulico desarrollado permite analizar de una forma global el sistema TJV-PJV (figura 7) para cualquier escenario de superficie de riego en explotación. En esta figura se observa cómo, para escenarios de superficie de riego entre 50 y 100%, el TJV no es capaz de aportar las necesidades de riego. Este hecho se extiende hasta una superficie de 20%, en el caso de que solamente se tenga en cuenta el volumen distribuido para riego, detrayendo el volumen destinado en un principio para abastecimiento.

Estos resultados ponen de manifiesto la necesidad de seguir teniendo que cubrir estas necesidades de riego con recursos propios procedentes de aguas subterráneas fundamentalmente, y en los casos que sea posible con recursos procedentes de aguas regeneradas.

Resultados. Modelación energética: energía potencialmente recuperable en el sistema

En cuanto a los resultados obtenidos en la cuantificación de la energía recuperable, en las diferentes entregas existentes en el sistema Postravase Júcar-Vinalopó, al inicio se debe tener en cuenta que estimar la energía recuperable en este sistema presenta la ventaja de que el caudal potencial a turbinar es un caudal fijo. Este caudal es fijado por el órgano gestor del PJV en la distribución de caudales del sistema. Este hecho permite fijar el punto de trabajo, excepto la altura recuperable en cada caso.

La altura recuperable vendrá establecida por el modelo, en función de la distribución de caudales existente en ese instante en el sistema, y de los niveles de la balsa de cabecera y/o niveles de la balsa de entrega, en caso de que se realice la misma por el fondo de la balsa.

En la figura 8 se observa la zona de trabajo teórica de la máquina hidráulica a instalar, obtenida para caudales turbinados en la balsa de cabecera del PJV (Balsa La Cuesta) (figura 8, izquierda) y en una balsa de derivación del sistema que tiene fijado un caudal de entrada a 0.35 m³/s (figura 8, derecha). Estos resul-

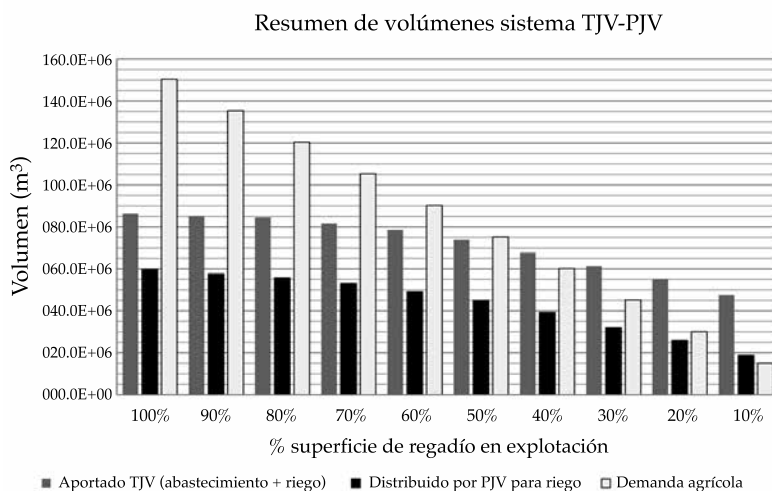


Figura 7. Análisis global de volúmenes del sistema TJV-PJV en función de la superficie de riego en explotación.

tados se pueden determinar de igual forma en cualquiera de los 20 puntos donde se ha analizado su viabilidad a partir del modelo desarrollado.

Las zonas de trabajo presentadas en las gráficas se obtuvieron mediante el modelo desarrollado en *Epanet*, obteniendo para cada uno de los 20 puntos de estudio de recuperación energética, los valores de presión disipados en la válvula para cada instante, teniendo en cuenta el caudal entregado en la balsa receptora y el caudal circulante en cada instante en el sistema de distribución PJV, así como el escenario de superficie en cultivo. La modelización de los diez escenarios de superficie de riego con valores de caudal entregado diferente a la balsa ha permitido obtener la curva envolvente máxima y mínima que delimita la zona de trabajo de la futura máquina hidráulica a instalar.

La situación más probable en la entrega de caudales a las balsas es trabajar a un caudal fijo (establecido por la entidad explotadora), por lo que la zona de trabajo quedaría supeditada al caudal establecido y al rango de alturas disipadas por la válvula y que han sido estimadas en la modelización del sistema. En la figura 8 se muestra la zona de operación de una máqui-

na a instalar en el salto hidráulico de la balsa La Cuesta (Cabecera del PJV), con una altura recuperada comprendida entre los 60 y 30 mca para el rango de caudales de 1.00 y 2.50 m³/s. Del mismo modo, en la figura 8, derecha, se muestra el ejemplo de la zona de trabajo de una máquina instalada en la derivación de caudales en la balsa El Rollo. En este punto, el salto estaría comprendido entre 120 y 80 mca, en un rango de caudales entre 0.10 y 0.35 m³/s, respectivamente.

El modelo desarrollado no sólo permite analizar la zona de operación de la máquina sino que establece la energía recuperable en función del escenario de superficie de cultivo de regadío en explotación existente. Por tanto, para cada escenario de explotación y para cada uno de los 20 puntos analizados de posible recuperación se puede determinar el caudal máximo y mínimo turbinado, altura máxima y mínima recuperable, potencia máxima y mínima de la máquina generada, la energía recuperable anual (kWh/año), el volumen anual turbinado (hm³), y los parámetros económicos que establecen *a priori* la viabilidad o no del proyecto descritos en el apartado anterior (PR e IE). Como resultado, se adjuntan los valores obtenidos en la válvula

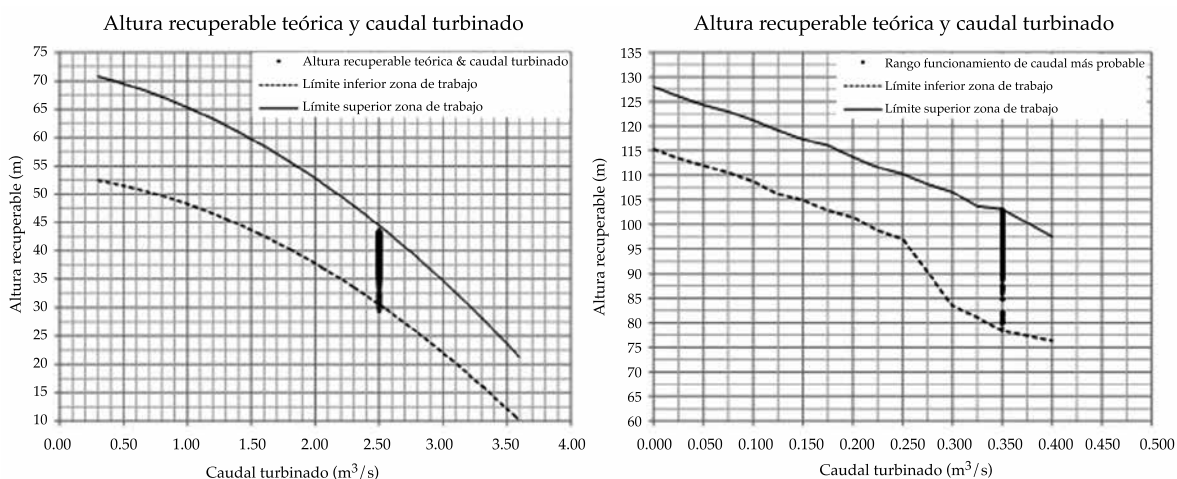


Figura 8. Ejemplo de zonas de trabajo teóricas en puntos de posible recuperación energética. Izquierda: recuperación en balsa La Cuesta. Derecha: recuperación en derivación a balsa del Rollo.

reguladora de caudal instalada en la balsa del Rollo (cuadro 3).

Se ha elegido este punto como ejemplo, pues es el área de distribución del PJV donde se produciría una mayor recuperación energética, estimándose el valor de energía recuperada entre 725 y 2 625 MWh/año, en función del escenario (hipótesis) de superficie en cultivo. El cuadro 3 muestra que con excepción de situaciones con una superficie de riego en explotación por debajo del 40% (algo improbable cuando la superficie media de cultivo en estas comarcas se encuentra entre 60 y 70% según las entrevistas realizadas), la viabilidad del proyecto es positiva, con un PR por debajo de seis años e IE inferior a 0.4 €/kWh·año.

Establecidos los puntos que presentan viabilidad del proyecto de aprovechamiento energético, la figura 9 muestra la energía consumida por el sistema TJV, la energía estimada recuperable en el sistema PJV (con un valor máximo acumulado de 18 418 MWh/año) y el porcentaje que representa esta última sobre la primera. La energía consumida hace referencia a la energía necesaria para elevar el agua desde La Marquesa hasta la balsa de San Diego, en función del volumen trasvasable. La línea de energía recuperada muestra la energía que

potencialmente se podría recuperar instalando las turbinas en las localizaciones que en la investigación han sido consideradas viables (un total de cinco de las 20 posibles ubicaciones). No se ha tenido en cuenta el propio rendimiento de las máquinas que bajaría en consecuencia la energía real recuperada.

Por último, el porcentaje de energía recuperada hace referencia a la relación existente entre la energía recuperada y energía consumida para un determinado volumen trasvasable. En la figura 9 se observa que el porcentaje de energía recuperada no supera el 7% para valores de trasvase inferiores a 80 hm³. El desarrollo y estudio de estos puntos de recuperación energética supondría reducir la huella de energía del agua del sistema actual del TJV 2.45 kWh/m³ (consecuencia de la elevación de los 786.75 mca de impulsión) a 2.28 kWh/m³ debido a que el modelo ha estimado que un 7% de la energía utilizada para elevar el agua desde la Marquesa hasta la balsa de San Diego puede recuperarse en los saltos viables.

Conclusiones y desarrollos futuros

Esta contribución recoge el análisis de caudales discretizados en el tiempo en un gran sistema

Tabla 3. Resultados obtenidos de los índices de viabilidad de instalar una central en balsa Rollo.

Hipótesis	100%	70%	50%	30%	10%
$Q_{\text{máx}}$ (m ³ /s)	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43
$H_{\text{máx}}$ (m)	106.6	119	120.4	120.5	120.6
$P_{\text{máx}}$ (kW)	449.7	502	507.9	508.6	508.9
$Q_{\text{mín}}$ (m ³ /s)	0.4	0.39	0.38	0.38	0.4
$H_{\text{mín}}$ (m)	89.2	85.4	84.5	83.8	90.8
$P_{\text{mín}}$ (kW)	346.1	324.9	318.8	313.4	352.3
Energía (GWh/año)	2.6	2.58	2.19	1.49	0.73
V_{TURB} (hm ³)	12.81	12.35	10.33	6.69	3.11
t_{TURB} (h)	8 761	8 408	7 008	4 485	2 058
Ingresos (€/año)	220 972	217 147	184 333	125 459	61 035
Gastos (€/año)	38 086	37 427	31 771	21 624	10 520
PR (año)	3.69	4.19	4.99	7.35	15.11
IE (€/kWh)	0.26	0.29	0.35	0.51	1.05

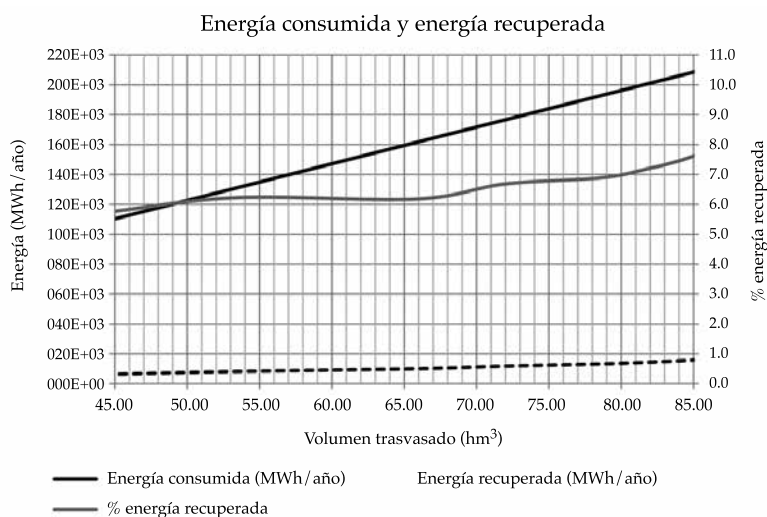


Figura 9. Energía consumida vs. energía recuperada en el sistema TJV-PJV.

de distribución en España, como es el trasvase-postrasvase Júcar-Vinalopó, cuyo objetivo es reducir el déficit hídrico de más de 50 000 ha de regadío existentes en las comarcas del Alto, Medio y Bajo Vinalopó, y L'Alacantí. Se reducen de esta forma las extracciones en los pozos de captación existentes en dichas comarcas, que son actualmente sobreexplotados, con el fin de recuperar sus niveles piezométricos a largo plazo. Se debe tener en cuenta que todo volumen transferido desde el TJV no es extraído de los acuíferos sobreexplotados de la cuenca del Vinalopó, los cuales, en algunos casos, se encuentran salinizados, con las implicaciones medioambientales relacionadas con contaminación de suelos que se derivan de su uso como agua de riego.

Así, se ha propuesto una metodología que permitiese la optimización del sistema, desarrollando un modelo de funcionamiento en *Epanet*. En esta simulación se han utilizado herramientas pertenecientes al *software* propio, al igual que la implementación de "subsistemas" hidráulicos conectados al propio sistema principal, con el fin de poder realizar un análisis, teniendo en cuenta la capacidad de trasvase y regulación de volúmenes en la infraestructura.

La importancia del modelo desarrollado radica en su utilización en el momento que se ponga en funcionamiento el sistema TJV-PJV para llevar a cabo su explotación cuando se proceda a su calibración mediante los elementos de medida de presión y caudal existentes. Una vez realizado el proceso de calibración se obtendrá una herramienta informática totalmente validada, que permita establecer la explotación de red presurizada en función de la demanda de riego, la demanda urbana y la capacidad disponible en las infraestructuras de regulación de volúmenes existentes, pudiendo tomar decisiones que permitan maximizar en todo momento la distribución de volúmenes procedentes del TJV.

El análisis conjunto del sistema permite valorar la capacidad de garantizar la demanda de riego en las 59 balsas que integran el Postrasvase Júcar-Vinalopó, determinando en función de la superficie de riego en explotación el volumen necesario a aportar de recursos propios (en particular, pozos de captación). Este análisis arroja que no existe justificación ni criterios objetivos que determinen qué pozos de captación deben clausurarse debido a que en

caso de que no se produzca un aporte superior a 50 hm³ anuales del trasvase Júcar-Vinalopó, los caudales deficitarios en las entidades de riego deberán proceder de las extracciones subterráneas. En la mayoría de las entidades analizadas, si las demandas son superiores al 60 o 70% de la superficie de riego en explotación, se deben apoyar los volúmenes demandados con aguas procedentes de pozos de captación.

El presente trabajo concluye desarrollando un estudio profundo de las posibles relaciones agua-energía en el sistema conjunto. Considerando la viabilidad económica del establecimiento de los diferentes saltos hidráulicos existentes en PJV en su margen derecha, de acuerdo con el modelo desarrollado, se llega a obtener un valor máximo de energía recuperable teórica de 18 418 MWh/año. De este estudio se desprende que de las 20 localizaciones posibles que han sido objeto de análisis, en cinco de ellas es recomendable el desarrollo de sus respectivos proyectos. Este aprovechamiento energético estimado contribuiría a recuperar un 7% de la energía consumida para elevar el agua desde el Azud de la Marquesa hasta la balsa San Diego.

En cuanto a los desarrollos futuros, puede plantearse el análisis energético del sistema no sólo para poder generar y vender energía eléctrica a la red distribuidora, sino para plantear aprovechar esa energía disipada por las válvulas de regulación. Esta energía podría servir para procesos de tratamientos de aguas residuales que hoy día no pueden emplearse para el riego debido al coste económico que conlleva su tratamiento.

Planteados estos análisis se podrían desarrollar sistemas autosuficientes dentro de las propias entidades de riego. Se conseguiría así reducir el déficit hídrico, las extracciones procedentes de masas de aguas subterráneas y mejorar la calidad del agua usada, así como la cantidad de energía demandada a fuentes externas. Aplicando estas medidas, disminuiría de forma considerable la huella de carbono de la producción de agua de calidad en el sistema conjunto.

Referencias

- Abreu, J., Cabrera, E., Espert, V., García-Serra, J., & Sanz, J. (2012). *Transitorios hidráulicos. Del régimen estacionario al golpe de ariete*. Valencia: Universidad Politècnica de Valencia.
- Bru-Ronda, C. (1993). *La sobreexplotación de acuíferos y los planes de ordenación hidráulica en la cuenca del río Vinalopó: Alicante*. Investigaciones Geográficas. Recovered from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=111583&info=resumen&idioma=ENG>.
- Cabezas, F. (2006). *Trasvase Júcar-Vinalopó. Análisis de alternativas*. Villena, España: Junta Central de Usuarios del Vinalopó, L'Alacantí y Marina Baixa.
- Cabrera, E., Cobacho, R., & Soriano, J. (2014). Towards an energy labelling of pressurized water networks. *Procedia Engineering*, 70, 209-217. Recovered from <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.024>.
- Carravetta, A., Del Giudice, G., Fecarotta, O., & Ramos, H. M. (2012). Energy production in water distribution networks: A PAT design strategy. *Water Resources Management*, 26(13), 3947-3959. Recovered from <http://doi.org/10.1007/s11269-012-0114-1>.
- Castro, A. (2006). *Minicentrales hidroeléctricas*. Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Recovered from http://www.energiasrenovables.ciemat.es/adjuntos_documentos/Minicentrales_hidroelectricas.pdf.
- Choulot, A. (2010). *Energy recovery in existing infrastructures with small hydropower plants. FP6 Project Shapes (work package 5- WP5), European Directorate for Transport and Energy. FP6 Project Shapes (work package 5- WP5)*. Brussels: European Directorate for Transport and Energy.
- Corominas, J. (2010). Agua y energía en el riego en la época de la sostenibilidad. *Ingeniería del Agua*, 17(3): 219-233. <https://doi.org/10.4995/ia.2010.2977>
- De León-Mojarro, R., Verdier, J., Piquereau, A., Ruiz-Carmona, V., & Rendón-Pimentel, L. (2002). Regulación de una red de canales de riego. *Ingeniería Hidráulica en México*, 17(4), 21-35.
- Doorembos, J., & Pruitt, W. O. (1977). *Las necesidades de agua de los cultivos*. Roma: FAO.
- Emec, S., Bilge, P., & Seliger, G. (2015). Design of production systems with hybrid energy and water generation for sustainable value creation. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17(7), 1807-1829. Recovered from <http://doi.org/10.1007/s10098-015-0947-4>.
- Espert, J. (2009). *Estudio de las estrategias óptimas de operación de la conducción del Trasvase Xúquer-Vinalopó*. Proyecto Final de Carrera. Valencia.
- Espín, J. M. G. (1997). El regadío en el umbral del siglo XXI: planes de mejoras y modernización. *Papeles de Geografía*. Recovered from <http://revistas.um.es/geografia/article/view/45941>.

- Ferrer, C., Sánchez-Romero, F., Torregrosa, J., & Zapata, F. (2002). *Plan de Obras y Actuaciones para la Comunidad General del Medio Vinalopó y L'Alacantí*. Valencia: Generalitat Valenciana.
- Gilron, J. (2014). Water-energy nexus: matching sources and uses. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 16(8), 1471-1479. Recovered from <http://doi.org/10.1007/s10098-014-0853-1>.
- IDAE (2005). *Ahorro y eficiencia energética en agricultura de regadío*. Madrid: IDAE.
- López-Ortiz, M. I., & Melgarejo-Moreno, J. (2010). El trasvase Júcar-Vinalopó: una respuesta a la sobreexplotación de acuíferos. *Investigaciones Geográficas*, 51, 203-233. Recuperado de <http://doi.org/10.14198/INGEO2010.51.09>.
- Luis-de-Nicolás, V., Laguna-Peñuelas, F., & Viduera, P. (2014). Criterio para la optimización energética de redes ramificadas de agua. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(6), 41-54.
- Murillo-Díaz, J. M., Sánchez-Guzmán, J., Castaño-Castaño, S., Amayor-Cachero, J. L., Gómez-Gómez, J. de D., Roncero, J., & Corral Lledó, M. del P. (2009). *Alternativas de gestión en el sistema de explotación Vinalopó-L'Alacantí*. Alicante, España: IGME.
- Pardo, M. A., Manzano, J., Cabrera, E., & García-Serra, J. (2013). Energy audit of irrigation networks. *Biosystems Engineering*, 115(1), 89-101. Recovered from <http://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.02.005>.
- Pérez-Sánchez, M., García-Serra, J., Torregrosa, J.B., & Zapata, F.A. (2012) *Optimización de la explotación del Postrasvase Júcar-Vinalopó, con análisis de la viabilidad de su aprovechamiento energético*. Trabajo final de máster. Valencia: Universitat Politècnica de Valencia. Recuperado de <https://riunet.upv.es/handle/10251/17930>.
- Pizarro, C. F. (1996). *Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF). Goteo, micro aspersión y exudación*. Madrid: Mundi-Pren.
- Ramón-Morte, A., Olcina-Cantos, J., & Rico-Amorós, A. M. (1990). El cultivo de la uva de mesa en el Medio Vinalopó: recursos hídricos y riegos localizados de alta frecuencia. *Investigaciones Geográficas*. Instituto Universitario de Geografía. Recovered from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=111556&info=resumen&idioma=ENG>.
- Rossman, L. A. (2000). *Epanet Manual*. Cincinnati: UEPA Risk Reduction Engineering Laboratory, Office of Research and Development.
- Salazar-Moreno, R., Rojano-Aguilar, A., & López-Cruz, I. L. (2014). La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(2), 177-183.
- Silva-Hidalgo, H., Aldama, Á. A., Martín-Domínguez, I. R., & Alarcón-Herrera, M. T. (2013). Metodología para la determinación de disponibilidad y déficit de agua superficial en cuencas hidrológicas: aplicación al caso de la normativa mexicana. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 4(1), 27-50.

Dirección institucional de los autores

Dr. Modesto Pérez-Sánchez

Universitat Politècnica de València
Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente
Camino de Vera s/n
46022 Valencia, ESPAÑA
Teléfono: +34 (96) 387 700, ext. 28440
mopesan1@upv.es

Dr. Francisco Javier Sánchez-Romero

Universitat Politècnica de València
Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria
Camino de Vera s/n
46022 Valencia, ESPAÑA
Teléfono: +34 (96) 387 700, ext. 75430
fcosanro@agf.upv.es

Dra. P. Amparo López-Jiménez

Universitat Politècnica de València
Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente
Camino de Vera s/n
46022 Valencia, ESPAÑA
Teléfono: +34 (96) 387 700, ext. 86106
palopez@upv.es