



# Nexo agua-energía-soluciones técnicas a problemas técnicos

*Luis Juana y Raúl Sánchez*  
Universidad Politécnica de Madrid

## 1. Introducción

La relación agua y energía es consustancial. Cada unidad de masa de agua, en función de sus características y localización, tiene un potencial o capacidad para desarrollar un trabajo. Es decir, tiene una energía que, bajo ciertas condiciones, se puede reducir o aumentar a voluntad, aunque con sus correspondientes rendimientos. El agua se mueve espontáneamente en la dirección en la que decrece su potencial y en su recorrido pierde la energía correspondiente al salto entre los niveles inicial y final. Parte de esa energía puede ser aprovechada directamente o después de su transformación. Una central hidroeléctrica es un ejemplo en el que una turbina absorbe energía al agua y su energía mecánica es la entrada a un generador que la transforma en energía eléctrica. Asimismo, el agua puede recibir parte de la energía que absorbe una bomba hidráulica accionada con un motor eléctrico. En este caso, el punto inicial tiene menor energía que el final.

Lo anterior es aplicable a los sistemas de distribución (que trataremos aquí) en los que interviene la energía mecánica (cota, altura de presión y sumando cinético, aunque este último suele tener poca influencia), pero también a los procesos como la desalación –las sales reducen la energía del agua–. Una planta en contacto con agua salada, en vez de absorberla, puede cederla y deshidratarse. Para quitarle las sales es necesario aportar, al menos, su desnivel energético frente al agua pura, su presión osmótica. La mayor parte del agua del planeta está en los océanos y es salina, y por tanto inservible para los cultivos, pero una vez desalada se convierte en un recurso útil.

Un agua media del mar, con 35 g/L de Cl<sup>-</sup> a 20 °C, según la relación de Van't Hoff, tiene un potencial osmótico de -29 bar ≈ 0,81 kWh/m<sup>3</sup> ≈ -300 m, que se correspondería con el límite técnico del consumo energético para desalarla<sup>1</sup>. Si los rendimientos fuesen similares, desalar un m<sup>3</sup> del mar, absorbería la misma energía que bombearla desde 300 m de profundidad. O, si en el mar se instalase una tubería que alcanzase esa profundidad y colocásemos tramos de membrana como parte de la tubería se obtendría agua dulce en el interior y habría que elevarla desde esa cota.

• • • • • • •

<sup>1</sup> Considerando la densidad de referencia del agua y la aceleración de la gravedad estándar, la equivalencia entre dichas unidades es: 1 bar ≈ 0,02778 kWh/m<sup>3</sup> ≈ 10,2 m, o bien 1 kWh/m<sup>3</sup> ≈ 36 bar ≈ 367 m. Para referirse a la energía unitaria del agua puede emplearse el metro, energía por unidad de peso y también el bar y el kWh/m<sup>3</sup>, ambas de energía por unidad de volumen.



En la relación referida, la presión osmótica es proporcional a la concentración salina, lo que nos facilita la comparación energética entre aguas salobres de distintas calidades. Así, con la mitad de concentración, 17,5 g/L de CINa, requeriría la mitad de energía,  $0,40 \text{ kWh/m}^3 \cong -150 \text{ m}$ , valor hasta el que, de forma aproximada, se considera que podrían extraer aguas las plantas. Un agua para riego de salinidad alta, con una concentración salina  $2 \text{ dS/m} \cong 1.200 \text{ ppm} = 1,2 \text{ g/L}$ , apta con condiciones para riego, tendría un potencial de unos -10 m. Al regar una hectárea con esta agua, de evaporar  $4.000 \text{ m}^3/\text{año}$  se descargarían aproximadamente  $4.800 \text{ kg/año}$  de sales que, de no irse con la fracción de lavado, iría aumentando el contenido de sales del suelo hasta inhabilitarlo para su uso.

En regadío, la relación entre agua y energía se ha ido afianzando con el paso del tiempo por la evolución de soluciones técnicas. Inicialmente, aunque todavía con vigencia, la diferencia estaba entre regar y no regar, después, se han ido perfeccionando los riegos y se han extendido a otras zonas. La importancia de aplicar energía para dominar el agua ha ido creciendo, siendo la solución.

En el regadío tradicional, en los riegos por superficie (Figura 1), casi exclusivos hasta mediados del siglo pasado, el agua se movía por la acción de la fuerza gravitatoria y no necesitaba aportes energéticos, salvo quizás en la captación, donde se podían usar norias u otros artilugios para aumentar su cota y dominar desde ella las superficies a regar. Las inversiones en las fincas o huertos de los regantes eran mínimas, aunque las infraestructuras de presas, canales y obras de regulación y de toma, para que el regante dispusiera del caudal adecuado, podían ser importantes. En la última mitad del siglo pasado aparecieron los riegos a presión. Así, el regadío salió de los valles y se aumentó considerablemente la superficie de regadío (Figura 2). La superficie con infraestructura de riego, de 1,5 Mha en 1950 pasó a 3,4 Mha en el año 2000<sup>2</sup> y en la actualidad está alrededor de 3,7 Mha.

Para regar las zonas más altas no dominadas por la gravedad, con frecuencia se realizaba un bombeo a una balsa elevada, desde la que posteriormente se distribuía por gravedad hasta las distintas fincas. Otras veces, generalmente en superficies más pequeñas, se disponían bombeos directos hasta las fincas a regar. En estos casos, la energía que se necesita aportar no solo es la cantidad correspondiente al desnivel energético y a las pérdidas de energía en la conducción, sino también la requerida en los emisores para obtener una adecuada uniformidad de los riegos, es decir, que todas las plantas reciban cantidades similares. Con estas transformaciones, la energía consumida en las instalaciones de riego de 258 GWh ( $0,03 \text{ kWh/m}^3$ ) en 1950 pasaron a 1.788 GWh ( $0,10 \text{ kWh/m}^3$ ) en 2004 y a 4.017 GWh ( $0,17 \text{ kWh/m}^3$ ) en 2017<sup>3</sup>.

El riego por superficie es exigente en cuanto a preparación del terreno (la superficie debe estar adecuadamente explanada) y requiere de suelos profundos y homogéneos (no es posible aplicar pequeñas láminas y debe infiltrar en todos los puntos cantidades similares si el tiempo que el agua permanece en dichos puntos es similar). De no ser así, la uniformidad de los riegos disminuye considerablemente y con ello la eficiencia de las aplicaciones, lo que los hace poco competitivos. En los valles se suelen dar estas condiciones comentadas, pero no se daban en las nuevas superficies de regadío y, por tanto, en ellas los riegos por superficie no eran adecuados. Los nuevos riegos a presión no requerían de la explanación ni de la homogeneidad del suelo (si el agua se infiltra donde cae, la

• • • • • • •

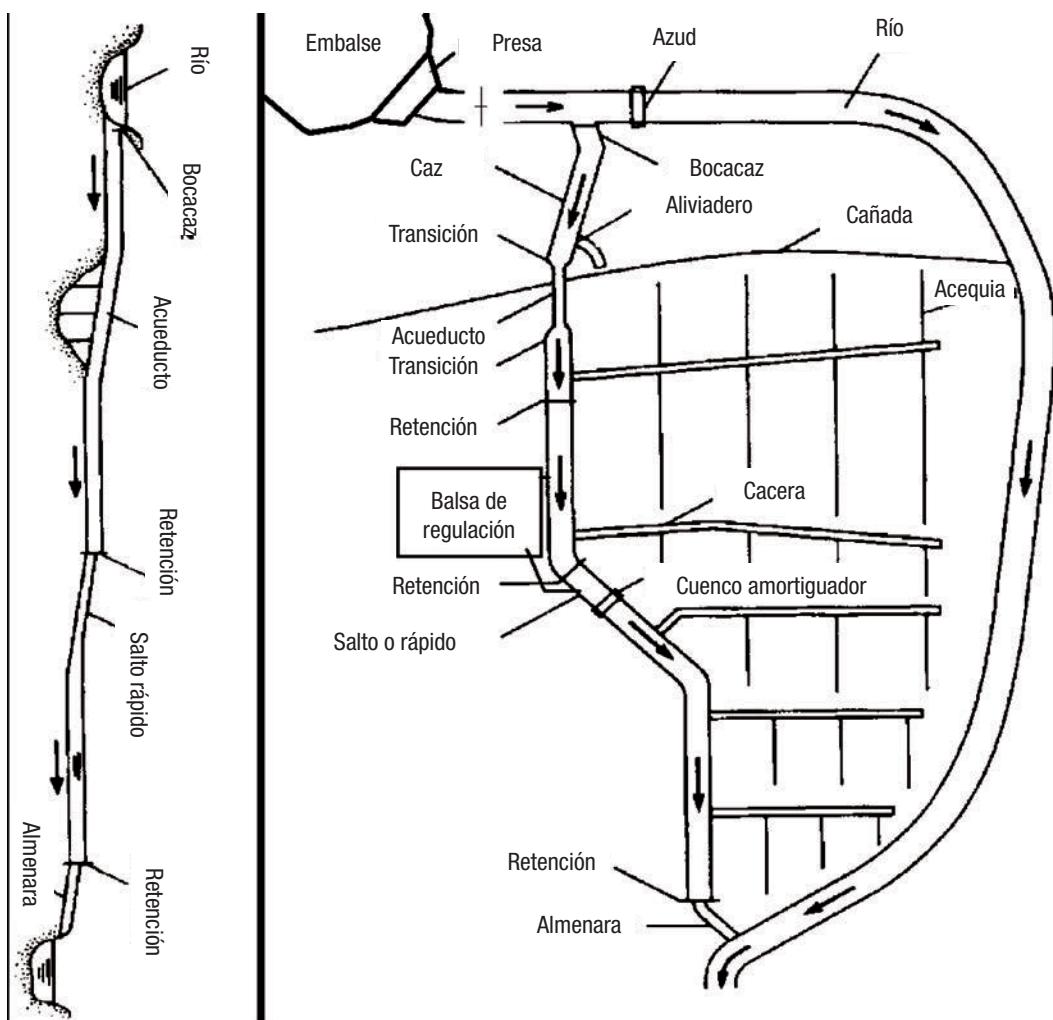
<sup>2</sup> COROMINAS MASSIP (2009).

<sup>3</sup> ESPINOSA-TASÓN (2022).

cuestión es distribuir en todos los puntos, superficie de alimentación de una planta, una cantidad similar). Para ello, en el método de riego por aspersión era necesario que el chorro tuviera un alcance acorde con la separación de los aspersores y pulverizar el agua con objeto de mojar toda la superficie. La pulverización requiere un consumo energético importante y la mayor energía de las gotas y su escaso peso favorece la evaporación y el arrastre por el viento, por lo que se aconseja evitar los instantes de alta radiación o con un viento considerable. La adecuada pulverización del chorro de un aspersor, de los que se usan frecuentemente en el regadío, suele requerir entre 2 y 4 bar, siendo mayor la presión cuanto mayor caudal y alcance tenga el aspersor seleccionado.

**Figura 1.**

Esquema típico de sistema de distribución para riegos por superficie





**Figura 2.**  
Ramat de aspersión pivotante



En el método de riego localizado por goteo no se requiere el aporte energético para pulverizar, pero es necesario colocar los emisores más próximos y, por tanto, se deben instalar más emisores y tuberías, es decir, supone una mayor inversión. No obstante, dado que el caudal desaguado por un orificio es proporcional a la raíz cuadrada de la presión aguas arriba del mismo y que esta no es la misma en todos los emisores, para obtener una adecuada uniformidad es necesario que la presión no sea demasiado baja. Las diferencias de presión originadas por las distintas cotas y por las pérdidas de presión por rozamiento son menos importantes cuanto mayor sea la presión de trabajo. En este sentido, la presión nominal<sup>4</sup> es orientativa. Sin embargo, por su importancia, es necesario mencionar a los emisores compensantes o autocompensantes que aportan un caudal aproximadamente igual cuando trabajan dentro de un rango de presiones, que se consigue haciendo que a más presión, una sección de paso se reduzca. El valor mínimo del rango puede variar de un fabricante a otro, pero suele estar entre 0,5 y 1 bar. El más alto resulta necesario cuando se desea que el gotero sea además antidrenante, con el fin de que no se vacíe la instalación por los puntos bajos cuando se corta el riego. Los pequeños pasos de los orificios de desagüe, para que a esas presiones aporten los pequeños caudales que necesitan, hacen a este método sensible a problemas de obturación, lo que requiere de una adecuada filtración de las aguas, que puede consumir una energía en torno a 0,5 bar.

La mayor uniformidad de los riegos, para aumentar la homogeneidad del cultivo y la eficiencia del uso del agua, es uno de los problemas técnicos que ha marcado la evolución de las instalaciones de riegos y que ha ocasionado el incremento del consumo de energía en el regadío. También otros aspectos como el de hacer explotaciones más competitivas, facilitando las aplicaciones con automatización y así aumentar la superficie de riego con relación a la mano de obra, han sido igual o más importantes en dicha evolución. Es sobre estas soluciones técnicas y al papel de la energía donde se incidirá fundamentalmente en este capítulo, presentando y discutiendo las soluciones actuales y su deseable evolución para, entre otros, reducir la energía.

• • • • • • •

<sup>4</sup> Presión nominal: 1 bar o 10,2 m o 0,0278 kWh/m<sup>3</sup>



Con la expansión del regadío, el agua ha pasado a ser un recurso más escaso y la afección al medio natural ha ido creciendo, lo que cada vez está más condicionado y también sus soluciones, menos volumen y de menor calidad, más caro y con mayor coste de energía.

En las soluciones técnicas de las redes de distribución de las comunidades y en las explotaciones de los regantes como, por ejemplo, en empresas agrarias se busca un equilibrio entre facilitar las aplicaciones y conseguir riegos eficientes, por una parte, y no aumentar en exceso los costes de inversión y de explotación, por la otra parte. La energía tiene un coste, pero usando más energía se puede: usar más agua (extracción de pozos, desalación y depuración de agua); regar más superficie; facilitar las aplicaciones de los riegos; y aumentar su eficiencia. Las soluciones actuales están razonablemente equilibradas con los costes de energía sufridos. Un encarecimiento de la energía como el que se ha producido en los dos últimos años (pasando de un valor alrededor de 40 euros/MWh, que había tenido en todo lo que va de siglo, hasta los casi 300 euros/MWh, que ha llegado a alcanzar, o unos 160 euros/MWh, julio de 2023, muy cambiantes), junto con unas previsiones poco favorables para que vuelva a sus valores anteriores, aunque parece que se pretenden reducir sus oscilaciones, determina que algunas de las soluciones actuales no están equilibradas y que conviene buscar otras más acordes a la nueva situación.

Además de la sostenibilidad técnico-económica, surgen problemas medioambientales que seguramente se descuidaron, pero que cada vez son más necesarios considerar. Aparece así otro equilibrio, no siempre fácil de resolver. Cuando se usa agua con alta concentración electrolítica (como ocurre en muchos regadíos) es necesario aplicar una fracción de lavado para no salinizar el suelo y mantener su fertilidad, sin embargo, dicha agua lleva también contaminantes, pesticidas y fertilizantes aportados a los cultivos, que pueden producir una afección negativa en la calidad de las masas de agua a las que llegan. Para evitarlo es necesario aumentar el control de las aplicaciones y de las lixiviaciones en las explotaciones agrarias.

Finalmente, las soluciones actuales deben incorporar las ventajas que aportan las tecnologías modernas y considerar las que presumiblemente las aportarán en el futuro próximo, teniendo en cuenta que los costes de dichas soluciones deben ser acordes a los beneficios para asegurar la rentabilidad.

En este capítulo, junto con una descripción de los métodos de riego y de sus instalaciones, así como de la situación del recurso agua y su productividad en España, se dedicará una especial atención a varios aspectos: a) posibles medidas para reducir la energía en la red de distribución de la comunidad y en las explotaciones de los regantes; b) sensibilizar sobre la conveniencia de dejar de aplicar los riegos con criterios demasiado simples (que no le falte agua al cultivo) y avanzar hacia la optimización de las aplicaciones en las unidades de riego, considerando tanto el coste del agua y de la energía como el de recuperación de las posibles afecciones ambientales. Las nuevas soluciones deben retroalimentarse buscando óptimos globales tanto en la instalación del regante como en la de la comunidad; c) recordar que el recurso agua es especial y que hay que tener presente que conceptos como consumo y pérdidas tienen matices, pero que son difíciles de valorar. En este sentido, se realiza una reflexión en la que en vez de hablar de consumo de agua se habla de movilización de agua para producir.



Se incluyen también reflexiones diversas sobre: a) el lavado de sales y la fertilización, con objeto de no producir afecciones medioambientales no deseables; b) el reparto de agua en condiciones de escasez y el papel que pueden jugar los mercados del agua<sup>5</sup>; c) la viabilidad económica de las medidas de modernización<sup>6</sup> tanto del conjunto (comunidad) como individual (regante).

El capítulo acaba con un apartado de perspectivas futuras y conclusiones, que se fundamenta en lo visto en los apartados anteriores.

## 2. Métodos de riego y sus sistemas de distribución

Un sistema de redes por acequias, frecuentemente, empieza en un embalse que sirve de elemento regulador, recoge el agua y la desembalsa a demanda (Figura 3). La no coincidencia temporal entre oferta y demanda los hace necesarios. La derivación del agua del río al cañal para su uso se realiza mediante un azud o retención, que permite obtener un nivel de agua casi constante, adecuado para poder desviar aguas arriba a un caudal asimismo casi constante. El trazado del cañal se hace con el criterio de dominar por gravedad la mayor superficie para riego, compatible con una conducción económica del gasto.

**Figura 3.**

Presa de Atazar y azud que sirve para abastecer a la Comunidad de Regantes de Mejorada del Campo y al Centro Nacional de Tecnología de Regadíos (sito en San Fernando de Henares)



Deben proyectarse obras especiales de toma (bocacaz), de conducción (puentes acueducto, túneles y sifones invertidos), de control (represas y compuertas de retención), de protección (aliviaderos y compuertas de descarga lateral), de aforo (vertederos y otros medidores de gasto), de disipación de energía (saltos y rápidas) y de derivación (partidores y tomas de regante), entre otras.

• • • • • • •

<sup>5</sup> Se considera un mercado de agua con información cierta, total transparencia y en el que el regante actúa con un único criterio, el de maximizar el beneficio de cada campaña.

<sup>6</sup> Analizar si compensan los cambios en el uso de agua, consumo de energía, márgenes de explotación e inversiones, considerando que algunos precios son inciertos en la vida del proyecto.



El aspecto fundamental de una red de acequias para riego por superficie es el control del caudal que, con frecuencia, se ha realizado indirectamente –como en el azud comentado– a través del control del nivel en el punto de toma. Se asegura que el nivel aguas arriba de una obra de retención sea relativamente independiente del gasto circulante, haciendo que el exceso no derivado vierta sobre una gran longitud para que la variación del caudal tenga una influencia escasa sobre el nivel. Para aumentar esta, el dique se construye en curva, en ángulo con el cauce o en línea quebrada. En redes de acequias son conocidos los denominados de «pico de pato» (Figura 4a). Existen también compuertas que controlan automáticamente el nivel (Figura 4b). Controlado el nivel, lo segundo para que el gasto sea constante es una descarga libre en la toma, que suele obtenerse con una pequeña elevación de la solera (Figura 4c). Finalmente, para poder seleccionar entre distintos caudales, por ser este proporcional a la anchura de vertido, en ocasiones, se dispone de módulos con diferentes gresores (Figura 4d), con la posibilidad de que esté cerrado o abierto, lo que permite en su conjunto un rango de selección de caudal amplio.

Los elementos de descarga libre, con una carga  $h$  suficiente (Figura 4c), pueden considerarse como aforadores. De cuidar la construcción de la sección de paso y de realizar el adecuado mantenimiento puede tenerse una estimación del caudal con una precisión razonable, con frecuencia equivalente a la de métodos más modernos, sobre todo, si se contrastan con ellos en campo y, en su caso, se calibran. Así, de establecer un valor de  $h$  constante y de conocer el caudal tomado, que sería también constante, el volumen usado sería proporcional al tiempo que la boca esté abierta. Sin embargo, en ocasiones, las obras de modernización de redes de acequias se centran únicamente en revestirlas para eliminar las pérdidas por filtración profunda y olvidan, en parte, esta calidad de regulación, que a la larga permite un mejor uso del agua en el cantero en el que se producen las pérdidas más importantes.

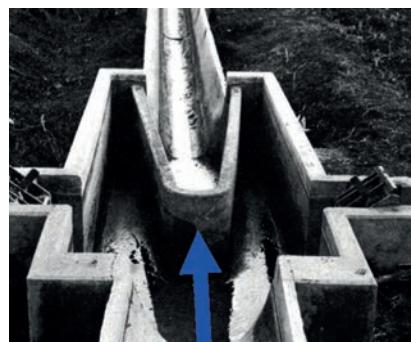
En la actualidad se usan elementos reguladores como compuertas, comandados por medidas en tiempo real de otras variables relacionadas con el caudal o directamente por caudalímetros. En la medida del caudal, en corrientes libres, destacan los basados en el efecto Doppler, que presentan la ventaja de no alterar –o hacerlo mínimamente– el flujo, por comparación con los tradicionales Parshall o los aforadores de pared gruesa, lo que implica menores pérdidas de energía. La pérdida de energía (cota) reduce la superficie que se puede dominar y, por tanto, la superficie regada desde un mismo punto.

El coste de inversión para realizar un riego a demanda en acequias se considera mayor que en redes a presión, pues es necesario aumentar su capacidad de almacenamiento debido a que las actuaciones desde el punto de alimentación tardan en llegar. A la hora de valorar este incremento del coste conviene tener presente que las incomodidades de un riego por turnos (turno de madrugada) son menores cuando se realizan de forma automática y programada. La automatización de las aplicaciones y el control del gasto mediante compuertas es asimismo posible en redes en acequias y, sobre todo, en redes por tuberías a baja presión (Figura 5). Como consecuencia, hoy en día, tanto en el riego por superficie como en los riegos a presión es posible manejar grandes superficies con una relativamente pequeña cantidad de mano de obra.

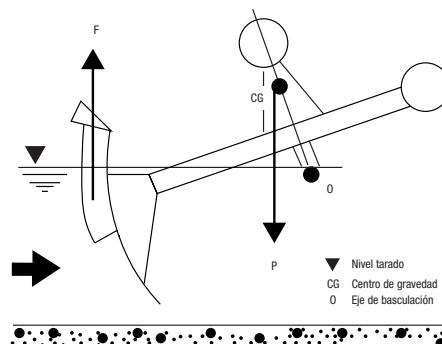
**Figura 4.**

Represas en pico de pato (a); Compuerta automática (b); Realce para producir un vertido no sumergido (c); y módulos para fraccionar el gasto máximo (d)

a) Vertederos «pico de pato» para controlar el nivel de aguas arriba



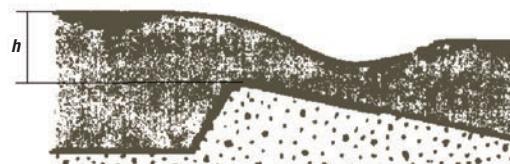
b) Compuerta para el control automático del nivel aguas arriba



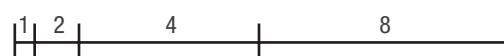
c y d) Realce y módulos



c) Realce para facilitar la descarga libre



d) División de la sección transversal



En parcela, la nivelación con tecnología láser ha hecho más competitivos los riegos por superficie, permitiendo tamaños de canteros, en algunos casos, de 300 m y 400 m de largo (algo impensable con la nivelación tradicional por métodos ópticos).

Por tanto, en el caso de disponer de suelos homogéneos, profundos y de textura media o fina, bien nivelados, con cultivos extensivos, que permitan láminas de riego altas (riegos espaciados o con baja frecuencia) y en los que no se deban hacer operaciones en los momentos en que los canteros están encharcados, el riego por superficie puede ser una alternativa viable por su menor coste de inversión y menor –o nulo– consumo de energía.

**Figura 5.**

Compuerta para automatizar el riego por superficie y por surcos alimentado con tuberías con compuertillas



En el riego por aspersión se han desarrollado métodos muy diversos. Como se ha indicado, ha permitido el riego en suelos de ladera, ondulados, poco profundos y heterogéneos. En suelos no nivelados es necesario evitar el encharcamiento, pues el agua escurriría hacia las zonas bajas y la uniformidad se reduciría. Esto ha impedido que en suelos pesados, con poca capacidad de infiltración, una de sus versiones más extendidas, el riego con pivote, puedan proyectarse con grandes longitudes, que es su factor importante para obtener su baja relación entre coste de inversión y superficie regada. En ese tipo de riego como, por ejemplo, los aspersores distales, que riegan más superficie, deben aportar más caudal, lo que puede ocasionar encharcamiento, por tanto, para evitarlo, como en todos los ramales de riego móviles, es necesario aumentar su velocidad, pero, lógicamente, aunque se le pongan rodadas, hay limitaciones técnicas. En riego con aspersores estáticos si se encharca es necesario reducir su lámina o tiempo de riego. Como se ha señalado, la distribución del agua desde el aspersor requiere la pulverización del agua en gotas para producir una lluvia homogénea, lo que exige un consumo de energía importante, ya que favorece la evaporación y el arrastre de las gotas por el viento. Para disminuir el efecto del viento, además de una menor pulverización, reduciendo algo la presión, es aconsejable colocar los aspersores próximos al suelo o al cultivo (Figura 6).

**Figura 6.**

Riego con pivote con bajantes para reducir el efecto del viento



La selección del sistema de riego por aspersión está restringida según los cultivos a implantar y las labores a realizar. Entre los costes destacan los de inversión, los de energía y los de mano de obra. Tanto por la incertidumbre de su disponibilidad como por el incremento de su coste se produjo una tendencia hacia la reducción de la mano de obra, pasándose de los sistemas móviles y semifijos de los primeros años a los sistemas fijos o de cobertura total. El riego por pivote central tiene gran aceptación, ya que junto a las pequeñas necesidades de mano de obra, está su aceptable calidad en la distribución de agua y su relativamente bajo coste por unidad de superficie regada. También hay que destacar los ramales autopropulsados no pivotantes, que se adaptan mejor a las formas rectangulares de las parcelas, si bien la más compleja alimentación, al irse moviendo, hace que se hayan extendido menos. El ramal móvil ofrece otras posibilidades, con las aplicaciones de los riegos, acoplando el instrumento, la instalación o el apero correspondiente. Así, al disponer de una o varias cámaras fotográficas (o de vídeo) puede obtenerse información sobre el cultivo. Incluso el procesamiento de la información en tiempo real puede desencadenar la aplicación de tratamientos específicos, discriminando las superficies que los necesitan de las que no.

El riego por aspersión se ha adaptado a condiciones de trabajo diversas en relación a suelos, clima, cultivos, mano de obra, tecnología, y recursos económicos disponibles. Para las condiciones más intensivas, en viveros, donde no es económico disponer de un gotero por planta, aspersores de bajo caudal y presión, se montan en carros móviles (Figura 7).

El coste de energía, entre los años 70 y 80, orientó la búsqueda de sistemas con menor presión de trabajo. La reducción ha sido significativa en los sistemas autopropulsados y pivotes, la menor distancia entre aspersores permite disponerlos de menor caudal (con boquillas más pequeñas) porque

requieren menos presión para pulverizar el agua. En los sistemas tradicionales de marco, la solución es más compleja, pues existe una relación óptima de alcance-presión-pulverización, ya que reducir la presión aconseja reducir marcos y con ello incrementar la inversión. También se ha avanzado en el diseño de boquillas, colocando elementos deflectores que guían el flujo del agua para conseguir el mismo alcance con menor presión, si bien la uniformidad del riego puede resentirse.

**Figura 7.**  
Riego por microaspersión para viveros



En general, es el cultivo el que aconseja el marco a utilizar. Los marcos más pequeños permiten una mejor distribución del agua y suelen establecerse para los más intensivos, pero sus costes de inversión tanto en aspersores (mayor número) como en tuberías (mayor longitud) son más altos, aunque los costes de energía suelen ser más bajos por las menores presiones de trabajo de los aspersores.

En ramales móviles, cuando se mueven por zonas onduladas (la cota de un mismo aspersor cambia significativamente en su recorrido) puede ser necesario disponer a los aspersores de reguladores de presión o de caudal, con objeto de que pierdan la energía sobrante y desagüen el mismo caudal, con independencia de la presión cambiante por la ubicación.

El riego por goteo presenta la ventaja sobre el riego por superficie, de no depender necesariamente de las características y homogeneidad del suelo y, frente al riego por aspersión, de que no pulverizar el agua, con lo que, por una parte, requiere menos consumo energético y, por otra, la aplicación localizada reduce la evaporación, además de no estar afectada por el viento. Otra característica, no menos importante, es que los sistemas fijos y con pocas necesidades de mano de obra permiten realizar aplicaciones frecuentes, y también localizadas, de interés para la intensificación de la producción. La no humectación de toda la superficie reduce la interferencia con el resto de las labores.



El pequeño gasto de los emisores, unido a presiones intermedias (para que las diferencias de cotas y las pérdidas de carga no afecten a la uniformidad), obliga a orificios de pequeño diámetro con riesgo de obturación. Con objeto de usar secciones de salida grandes y disminuir así ese riesgo se desarrollaron inicialmente goteros denominados de largo conducto como los microtubos, los helicoidales y, sobre todo, por su gran implantación actual, los de laberinto (Figura 8). También, para conseguir que las diferencias de presión, debidas a pérdidas de carga y desniveles, tuvieran menos incidencia en la uniformidad, se desarrollaron los goteros autocompensantes o compensantes, hoy en día mayoritarios. Estos permiten proyectar ramales de más longitud y con mayores desniveles, de gran interés para cultivos como el olivo, con frecuente implantación en terrenos de gran pendiente. La compensación se consigue con una pieza elástica, el elastómero, que, cuando hay más presión, obtura en mayor medida la sección de la salida para que el caudal sea similar. Una excesiva reducción de la sección de salida puede hacerlos más sensibles al atascamiento y a variaciones que se engloban en la manufactura y uso. En algunos casos es interesante que los goteros se cierren y no desagüen (antidrenantes) cuando la presión sea muy baja, para que cuando no se esté regando, los ramales no se descarguen por los goteros situados en los puntos bajos. Asimismo, en ocasiones se diseñan elementos que favorecen la limpieza o la no obturación (autolimpiantes). El diseño de emisores es un tema de interés que las grandes casas comerciales estudian y guardan sus secretos con recelo.

El atascamiento puede significar en muchas instalaciones una reducción drástica de la uniformidad. Por ello, se disponen filtros y tamices o coladores, e incluso se realizan tratamientos al agua. El filtro de arena, cada vez menos frecuente, se usa cuando se deben eliminar partículas de naturaleza orgánica y/o minerales de pequeño tamaño. Para eliminar partículas minerales de mayor tamaño se usan tamices o coladores (impropriamente llamados también filtros), que suelen ser de malla o de disco, o de anillas, y que están presentes en la práctica totalidad de las instalaciones de riego por goteo y en muchas de riego por aspersión. Normalmente, se ubican aguas abajo de los de arena (de instalar estos) y del punto de inyección del fertilizante. De esta forma, se evita el paso de algún grano de arena desprendido o de algún gránulo de fertilizante sin disolver.

La limpieza del propio filtro puede hacerse por inversión del flujo, cuando las pérdidas de carga superan un valor prefijado o aprovechando momentos oportunos. Frecuentemente, se instalan varios, de forma que la limpieza de uno se hace con el agua filtrada por los restantes. Conviene observar que en los instantes en los que se está produciendo la limpieza pueden resentirse las condiciones de presión y caudal del sistema, y que si no se han previsto elementos para la recogida de aguas, da lugar a vertidos al medio.

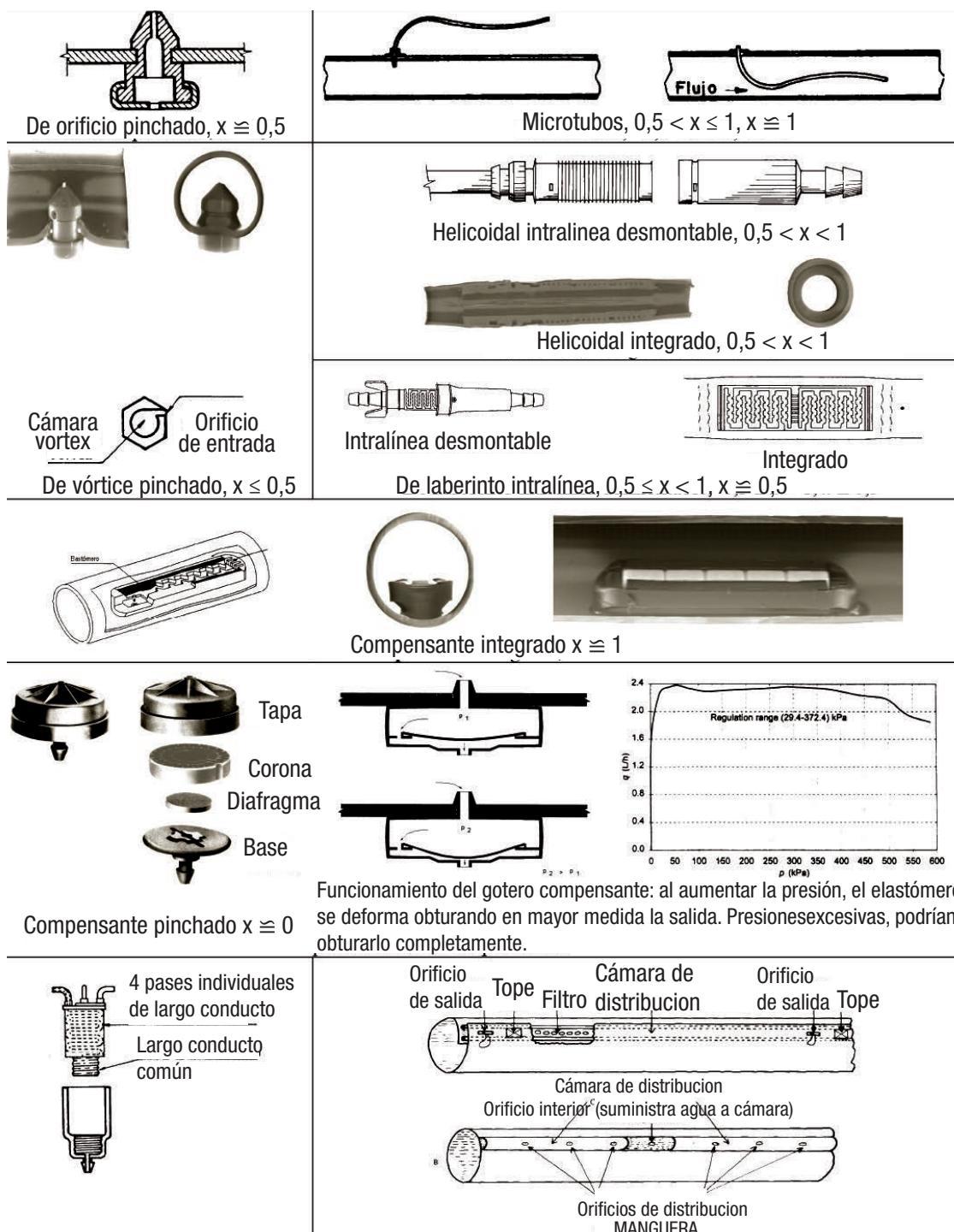
Los equipos de filtrado suelen tener unas pérdidas de carga importantes, entre 5 y 10 m, por tanto, se producen oscilaciones de presión en el sistema, ocasionadas por su estado de limpieza, que son significativas, con respecto a la presión de trabajo de los goteros, y puede implicar diferencias en la descarga de los goteros si estos no son autocompensantes.

Si, por unas causas u otras, la presión de trabajo de los goteros no se mantiene constante y, en consecuencia, tampoco el caudal, el frecuente control de los riegos por tiempo puede estar menos indicado que el control del volumen. Un aspecto de interés a favor de este último es el hecho de que la uniformidad de las aplicaciones en una unidad de riego por goteo es poco dependiente de la presión en cabeza o del caudal total que desagüe, por lo que el control por volumen reduce o incluso elimina la necesidad de regular la presión. No obstante, en el caso de regular la presión para que trabajen

siempre a la misma, habrá que valorar el hacerlo aguas abajo de los filtros para que las condiciones de trabajo sean aproximadamente iguales, con independencia de su estado de limpieza.

**Figura 8.**

Tipos de goteros y exponentes x de su ecuación de desagüe  $q = k \cdot p^x$





En el riego por goteo es frecuente la inyección de fertilizantes y de tratamientos con el agua usando bombas inyectoras o dosificadoras. En cultivos en los que la precisión en las concentraciones de los distintos componentes es importante, suele controlarse el pH y la conductividad eléctrica (CE) de la solución, que automáticamente se diluye o concentra hasta alcanzar las cifras deseadas, según unas consignas de actuación programadas. Para alcanzar el valor previsto se abre de manera pulsada, durante más o menos tiempo, una llave hidráulica que controla la salida del producto demandado para conseguir la disolución a inyectar. Además de posibles tratamientos con ácido para evitar el riesgo de obturación, conviene estar sin aplicar fertilizantes en la parte final de los riegos.

Un caso particular del riego por goteo es el subsuperficial, donde los ramales se suelen enterrar entre 10 y 40 cm. Entre sus ventajas destacan: a) menor evaporación; b) menor proliferación de malas hierbas; c) menores olores si se usan aguas residuales depuradas; d) mayor duración de las tuberías; y e) menores problemas de vandalismo. Por el contrario, aparte de los mayores riesgos de atascamiento y la mayor dificultad para su detección, el suelo puede influir en el desagüe de los goteros, en cuyo caso, su heterogeneidad se traduciría en una reducción de la uniformidad de las aplicaciones y, para que el suelo no influya, conviene además que los goteros sean compensantes y antidrenantes, y que su caudal sea menor que el que delimita su conductividad hidráulica para evitar una presión positiva en el punto de emisión. El aumento de la superficie en el punto de emisión y una cámara de aire, donde descarga el gotero, puede beneficiar y permitir incluso el uso de goteros no compensantes. El atascamiento por las raíces es causa de preocupación entre los fabricantes debido a la prohibición del uso de los tradicionales herbicidas derivados de la trifilarina, pues no se ha encontrado una solución definitiva, si bien es un riego en expansión, lo que es un indicador de que las soluciones buscadas son aceptables. En el riego subsuperficial, los ramales se suelen unir por cola con una tubería que en las operaciones de limpieza de los posibles sedimentos acumulados se abre por uno de sus extremos. Esta tubería, en condiciones normales cerrada, transforma a la red en mallada, mejorándose la uniformidad de la distribución de presiones. Es necesario, asimismo, disponer de purgadores para eliminar el aire y para que, en caso de no usar goteros antidrenantes, pueda entrar cuando se vacíe la red y la tubería no se pliegue debido a la presión negativa, consecuencia de la succión.

Otros métodos se aplican en casos específicos, aprovechando alguna característica del medio. Se trata de casos residuales. Un ejemplo es el riego subterráneo donde el nivel freático se controla dentro de un rango de profundidad adecuada. Puede tener interés en el futuro en suelos artificiales no muy extensos como jardines y campos deportivos. El control de la capa freática puede ir acompañado de una impermeabilización del subsuelo, lo que evita posibles afecciones.

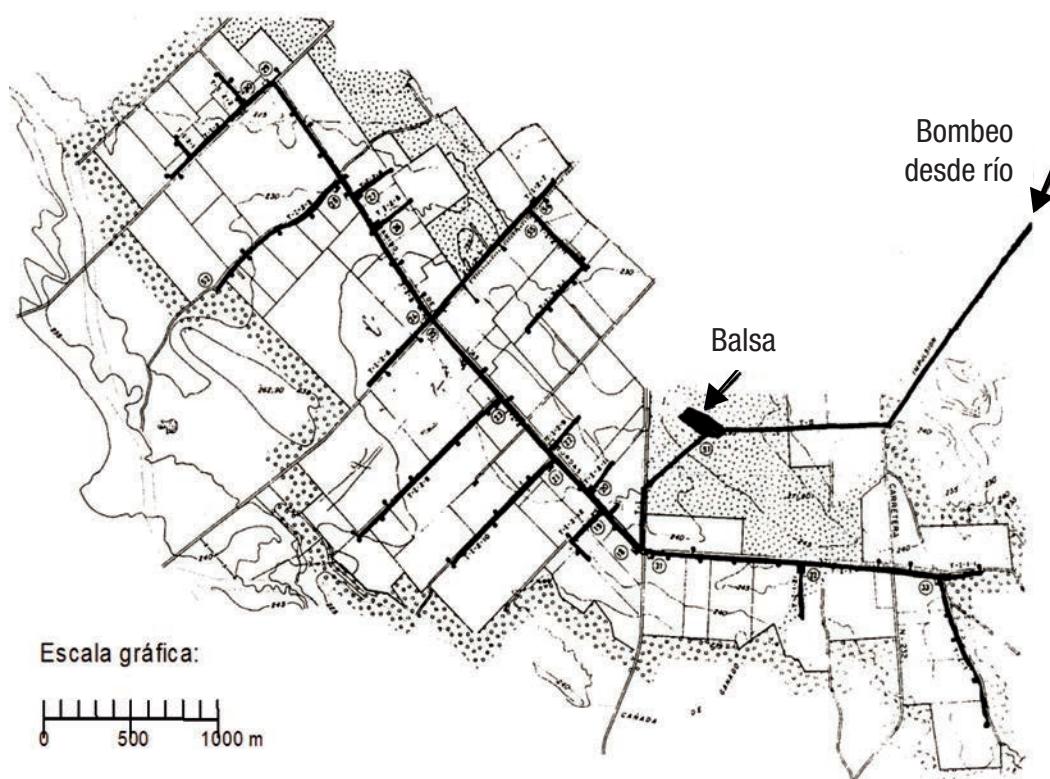
## 2.1. Sistemas de distribución a presión

En lo que se refiere a la red de distribución de la comunidad de regantes, en la Figura 9 se representa un sistema típico para riegos por aspersión y goteo. La repercusión del coste de energía y sus diferencias en las distintas horas del día justifica bombar en horas valle a una balsa localizada en un punto alto, para distribuir desde ahí por gravedad durante todo el día. La balsa se proyecta para almacenar el volumen elevado y consumido durante un día del periodo punta, a veces el volumen es de varios días o incluso una semana. De la balsa parte una red de tuberías que abastece cada boca de riego donde conecta el sistema de distribución del regante.

El ahorro energético en la estación de elevación es de interés. En riegos extensivos por aspersión, la factura eléctrica supone un coste que reduce –y, en ocasiones, hasta anula– el beneficio de la explotación. Además, la balsa facilita que las bombas siempre trabajen con un caudal apropiado y con alto rendimiento. Por contra, es necesario elevar a una altura mayor que en el bombeo directo, pero incluso así, la necesidad de aportar la energía necesaria en las bocas más desfavorables a toda la zona regable, hace que la eficiencia energética sea baja. El riego a demanda, con caudales variables en las conducciones de unos momentos a otros, también contribuye a un mayor consumo de energía.

En redes a presión con riego a demanda con impulsión directa, la estación de bombeo debe ser capaz de elevar el caudal requerido en periodo punta, pero fuera de esta, normalmente las necesidades son menores. A este respecto, es necesario fraccionar las necesidades realizadas con grupos en paralelo. Además, es habitual disponer a una bomba de un convertidor de frecuencia, con el fin de variar la velocidad de giro al impulsor, para que se adapte mejor a la demanda. Su efectividad va disminuyendo a medida que aumenta el número de bombas. No obstante, suavizan los arranques de las bombas y facilitan la automatización, por lo que cada vez son más extendidos, lo que ha permitido un menor precio. Hoy es muy frecuente instalar varias bombas con convertidor. Cuando el regante deba reelevar, la opción de instalar un convertidor tiene que ser valorada.

**Figura 9.**  
Zona regable con riegos a presión





Las bocas de riego se emplazan en arquetas para uno o varios regantes, si bien cada uno con su contador. En ellas suelen disponerse otros dispositivos como llaves manuales, cazapiedras, filtros y ventosas, entre otros. Además de la apertura y cierre automático de la llave hidráulica, está completamente extendido el uso de dos pilotos, uno para limitar el caudal y el otro para regular la presión (Figura 10).

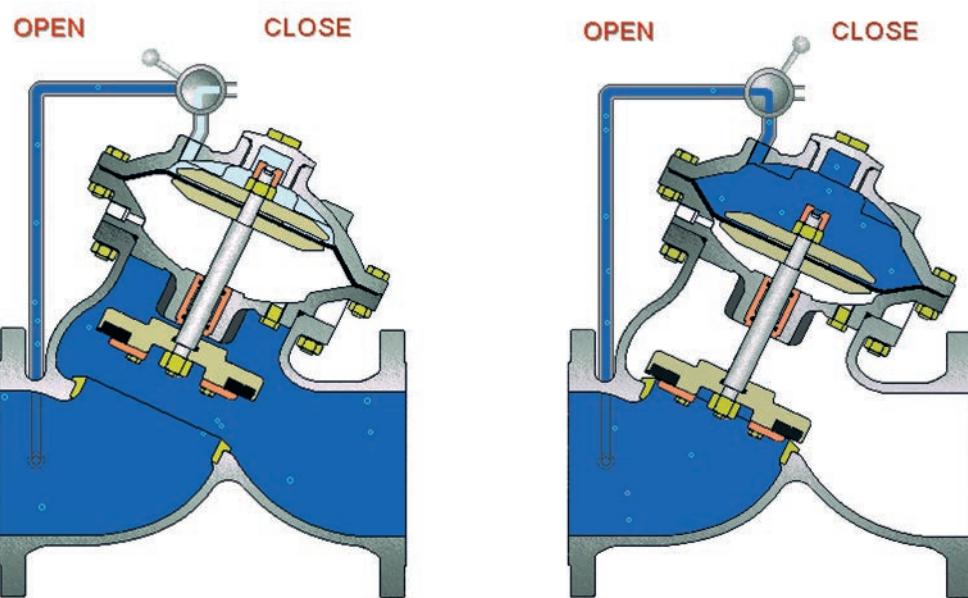
El regulador de presión tiene por objeto proteger al regante, reduciendo la presión sobrante. El limitador de caudal impide que el regante gaste más que lo contemplado y protege la red, evitando que un caudal excesivo, a través del incremento de las pérdidas de carga, produzca una «caída de presiones» en toda la red o en algunos de sus tramos. Asimismo, en riego a demanda, puede darse por un grado de simultaneidad mayor que el considerado en el proyecto. Por ello, en algún punto de la red, también puede instalarse un sostenedor de presión para garantizar una presión mínima aguas arriba de él.

La llave hidráulica abre o cierra en función de empujes diferenciales originados por la propia agua (Figura 11). La operación remota de apertura/cierre se hace con una electrollave o solenoide de tres vías, que conectan el agua de la cámara con el agua a presión de aguas arriba de la llave o con la atmósfera. Al activar una bobina con corriente eléctrica, se atrae un núcleo metálico para dejarlo abierto y tapar otro paso alternativo. Existen solenoides llamados «biestables» o *latch*, que cambian de posición por activación eléctrica, consumiendo energía únicamente durante el cierre o la apertura. Estos últimos disponen de dos bobinas: 1) de activación. Atrae el núcleo metálico, que queda retenido por un imán; y 2) de desactivación. Al estimularla desprende el núcleo metálico, que vuelve a su posición inicial, ayudado por un muelle. Su bajo consumo permite que en zonas sin tendido eléctrico sean alimentadas por una batería que se recarga con un panel solar.

**Figura 10.**  
Boca de riego



**Figura 11.**  
Llave hidráulica de diafragma en operaciones de apertura y cierre



Funcionamiento:

**Cierre:** al conectar la corriente de aguas arriba con la cámara, la presión en esta alcanza el valor existente allí, pero por actuar en una superficie sensiblemente mayor (frecuentemente tres veces) el diafragma, eje y opérculo se desplazan solidariamente hasta su asiento.

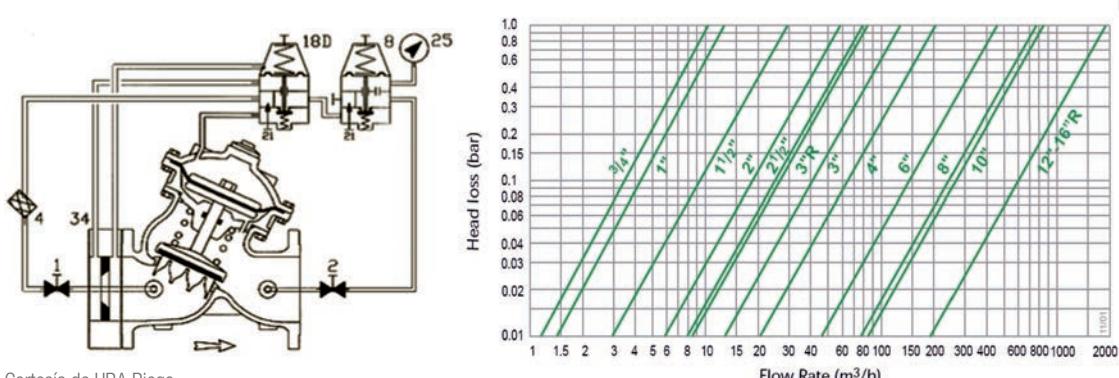
**Apertura:** inicialmente, por estar cerrada la llave, la presión aguas arriba es mayor que aguas abajo. Como consecuencia, al descargar el agua de la cámara a la atmósfera, la presión de aguas arriba abre la llave.

Fuente: cortesía de URA.Riego.

Una llave hidráulica puede regular el caudal o la presión aguas arriba o aguas abajo, controlando el grado de apertura. Así, si entra algo de agua en la cámara superior, el opérculo se desplaza en la dirección de cierre, disminuyendo el caudal (se usa para limitar el caudal), aumentando la presión aguas arriba (se usa para sostener la presión) y reduciendo la presión aguas abajo (se usa para regular la presión). Efectos contrarios se obtienen provocando que salga algo de agua de la cámara. La entrada o salida del agua puede conseguirse con solenoides que abren o cierran los circuitos oportunos, pero lo normal es utilizar pilotos, que son llaves hidráulicas de menor tamaño instaladas en el control. En estos se selecciona la presión a regular o sostener mediante la compresión de su resorte. La fuerza que ejerce para recuperarse (la constante del resorte por la longitud comprimida) se equilibra con la que ejerce el agua sobre un diafragma a la presión deseada. Si la presión es distinta, se desplaza el diafragma para alcanzar el nuevo equilibrio y así se estrangula más o menos el flujo en el circuito de control, lo que provoca el efecto deseado. Normalmente, en los limitadores de caudal se instala un orificio aforador para hacer corresponder el caudal con la diferencia de presión entre la sección de antes y la de después (que se colocan a uno y otro lado del diafragma del piloto). En la Figura 12 se muestra el esquema de una llave con un piloto limitador de caudal (18D) y otro regulador de presión (8); esta representación es seguramente la más usada en el regadío español. Dichas llaves tienen unas importantes pérdidas de carga (Figura 12b), por lo que se recomienda, para una mejor regulación, que la velocidad de paso no sea pequeña, además del ahorro de disponer de un diámetro menor.

**Figura 12.**

Llave hidráulica con reductor de presión y limitador de caudal (izquierda) y ejemplo de pérdidas de carga a considerar por la instalación de llaves hidráulicas en función del caudal y diámetro (derecha)



Cortesía de URA.Riego.

## 2.2. Ahorro de energía

La primera medida es el ahorro de agua, pues la energía consumida en las instalaciones de riego es prácticamente proporcional al agua aplicada, sin embargo, el volumen empleado dependerá de las necesidades del cultivo. Por esto, también se abordará la optimización del volumen de agua, con una función objetivo en la que puede intervenir el coste de la energía y, por tanto, su consideración conjunta.

En una red de riego, la energía de cada boca está marcada por la cota y la presión necesaria para regar toda la finca. A continuación, se muestra un ejemplo de red que riega 700 ha y que está basado en algunos datos reales, aunque los resultados pueden variar significativamente de un caso a otro. Así, en el Gráfico 1 se ve el trazado altimétrico de las bocas, junto con la altura de presión asignada. La alimentación está en el punto 0, tomado de comparación. La energía media ponderada (por la superficie) requerida en las distintas bocas es  $H_r = 74,1$  m (25,0 m, se deben a las cotas, 44,4 m a la presión y 4,7 a las pérdidas de carga, únicamente en el hidrante, función de su diámetros y caudal asignado). Este consumo sería el mínimo para regar con las condiciones establecidas, ya que si fuese menor pasaría por acortar las alturas de presión para regar desde algunas bocas y afectaría a los regantes involucrados.

Si se dispone de una balsa elevada, la cota debería ser de al menos 95 m (boca 48). Pero, en ese caso, habría que poner tuberías de gran diámetro para que las pérdidas de carga en el trayecto fuesen despreciables. Lo mismo ocurriría en un bombeo directo, siempre que riegue la boca 48. En caso contrario, podría reducirse algo ese valor si se dispusieran de tuberías de gran diámetro. Es decir, desde un punto de vista energético, el bombeo directo ofrece más flexibilidad que hacia una balsa, por ello, aunque se disponga de una es preferible realizar el bombeo directamente.

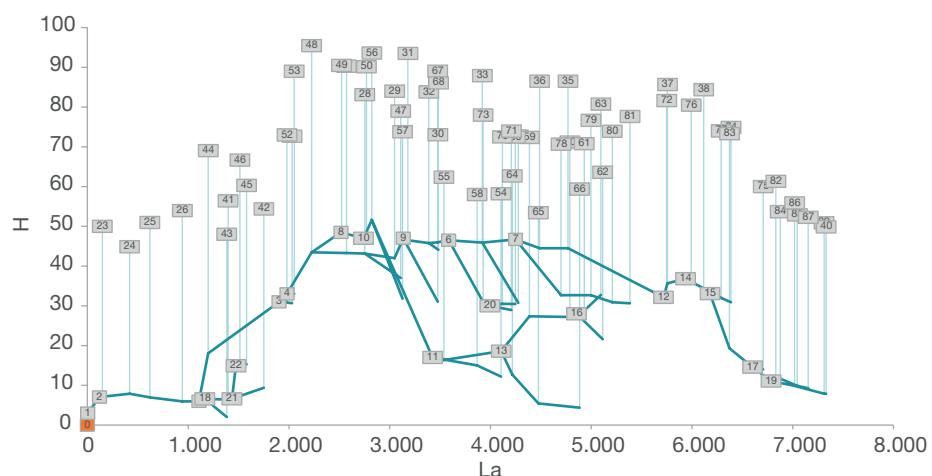
Para un riego a la demanda se determinan los diámetros de la tubería y la altura que tiene que elevar la estación de bombeo, con un mínimo coste, para que no falte presión en ninguna boca. Con los datos de precios usados para el ejemplo, la altura de elevación resultó  $H_B = 106,4$  m, valor que se tomará como referencia.

La solución resultante para disponer una energía de 74,1 m en las bocas requiere la elevación en cabeza a 106,4. La relación  $74,1/106,4 = 0,70$  sería el rendimiento. No obstante, todavía no está introducido el rendimiento de las bombas que, sin entrar aún en los detalles de la estación de bombeo, suele tener un orden de magnitud alrededor de 0,7 o 0,8, lo que implicaría que necesitamos usar el doble de energía ( $0,7 \cdot 0,7 = 0,49$ ) que la establecida como necesaria en las bocas.

Una vez proyectada la red, su funcionamiento dependerá de las bocas que estén trabajando simultáneamente (Gráfico 2). En la mayor parte de las bocas sobrará energía, que será disipada en el regulador de presión (líneas naranjas).

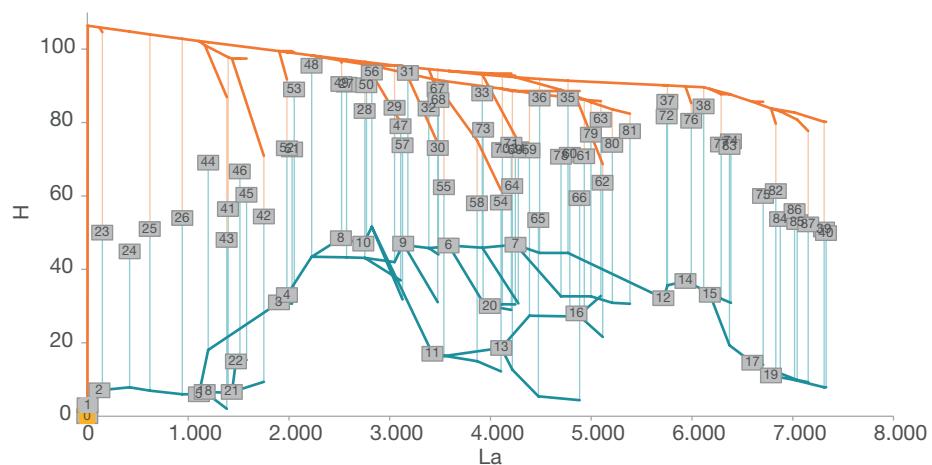
**Gráfico 1.**

Alzado altimétrico de la red y altura de presión necesaria en cada boca de riego



**Gráfico 2.**

Altura de energía a lo largo de la red (línea naranja gruesa) y altura a perder en las bocas de riego (línea naranja fina) en una situación concreta de funcionamiento





Un pequeño ahorro, que suele implementarse, se consigue haciendo que la altura a la que se elevan las bombas varíe según el caudal subido, pues cuando está bajo, hay menores pérdidas de carga en el recorrido (línea verde del Gráfico 3a) y se necesita menos energía. En el ejemplo, considerando una distribución de riegos a lo largo de la campaña, la reducción es de un 2 %, aproximadamente.

Se ha asumido que a algunas de las bombas se les ha instalado un convertidor de frecuencia. En caso contrario, la altura de elevación para cada caudal sería, por término medio, mayor de 106,4 m o mayor que la curva verde indicada (Gráfico 3b). Si no se ponen convertidores, el incremento de energía sería, en este caso, en torno a un 10 %.

Para un ahorro algo mayor habría que conocer que bocas están funcionando y elevarlas a la altura correcta para que no ninguna tuviera falta de presión. En el Gráfico 2 era de 105 m en la boca donde sobraba menos energía<sup>7</sup>. En el Gráfico 3, cada punto representa una situación y el conjunto las de toda la campaña. Aunque el ahorro parece mayor, supone un 4 %, ya que la mayoría de los puntos están superpuestos en las zonas más oscuras de mayor caudal y altura de elevación. Esta solución no suele implementarse, pero parece viable hacerlo, aunque sea parcialmente, para evitar algunos efectos no deseados de los transitorios, provocados por la apertura y cierre de bocas. Es necesario considerar que los tiempos de funcionamiento de las bocas es alto y la velocidad de transmisión de la presión en redes de tuberías (la velocidad de las ondas del golpe de ariete) puede ser, dependiendo del material, de varios cientos de metros por segundo, incluso pudiendo llegar a los 1.430 m/s en tuberías completamente rígidas y sin aire.

Un mayor ahorro se conseguiría si se transforma el riego a demanda en riego por turnos. Considerando el tiempo de riego diario de las bocas con un valor medio de 8,4 h y un máximo de 11,3 h, se han establecido dos turnos, en el que todas las bocas que no rieguen en el primero regarán en el segundo, alcanzando así un ahorro del 12 %. Para seleccionar qué bocas actúan en cada tanda resulta clave saber qué energía requiere cada una, para que estén activas en uno o en otro (Gráfico 4).

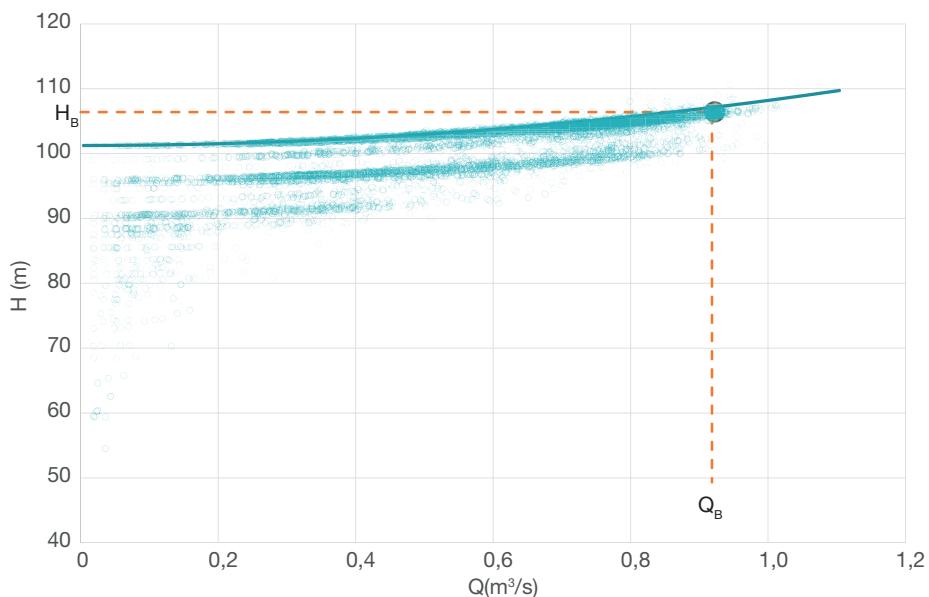
Si el riego es a demanda, una solución, que no se implementa, para la reducción energética (26 %) es que la estación de bombeo de la comunidad únicamente aplique la energía necesaria para que llegue el agua a todas las bocas, aunque falte energía en la mayoría de ellas y se tenga que hacer un rebombeo. Este caso se ha representado en el Gráfico 5 donde se aporta la energía mínima para que llegue agua a todas las bocas con presión positiva.

Cada punto del Gráfico 3 se desdobra en dos en el Gráfico 5. HSP1 (en azul) representa la altura que eleva la estación de bombeo. En este caso, como el agua no llega a las tomas con la presión suficiente, se debe hacer un rebombeo en cada una de ellas. HSP2 (en naranja) representa el valor medio ponderado de estas alturas de elevación de cada situación en parcela. La altura media a la que subiría la estación de la comunidad sería 54,5 m (el 55 % de 106,4 anteriores) y la de los regantes sería 24,7 m, que totalizan 79,2 m (el 74 % de 106,4; un ahorro del 26 %). Aquí, se ha considerado un rebombeo con variador de velocidad en parcela, pero no se han tenido en cuenta las pérdidas en el hidrante, pues se piensa que con el variador no sería necesario porque puede hacer de regulador de presión y limitar el caudal, e incluso de caudalímetro.

<sup>7</sup> Dentro de las que estaban regando era  $106,4 - 105 = 1,4$  m

**Gráfico 3a.**

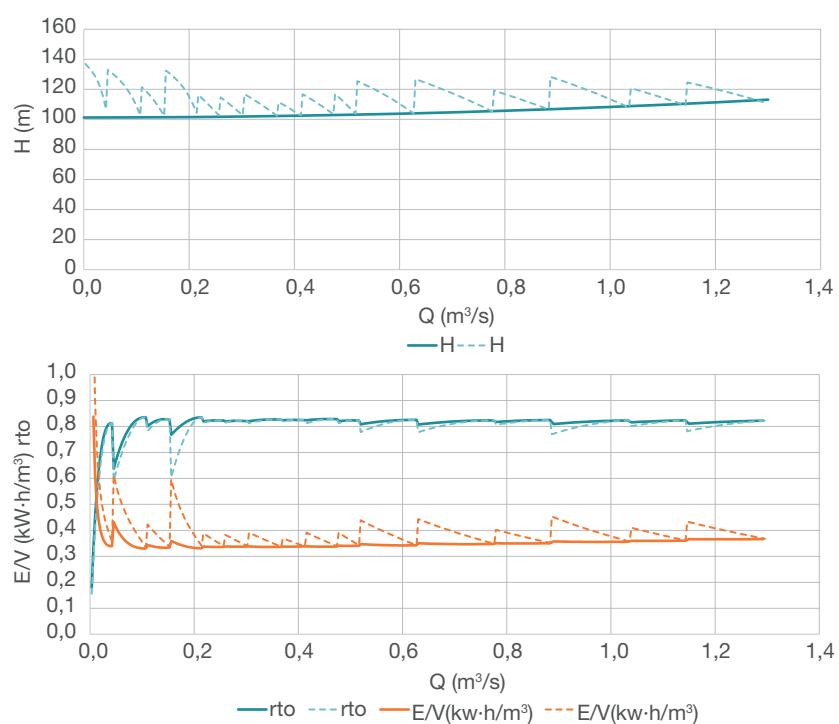
Necesidades de elevación en la red con riego a demanda



\* Valores obtenidos por sorteos aleatorios según las necesidades de las bocas y el periodo del año (puntos), curva  $Q-H$  para que la probabilidad de falta de presión en las distintas situaciones no supere el 5 % (curva continua verde) y punto de proyecto  $Q_B-H_B$  (punto marcado con líneas de trazos)

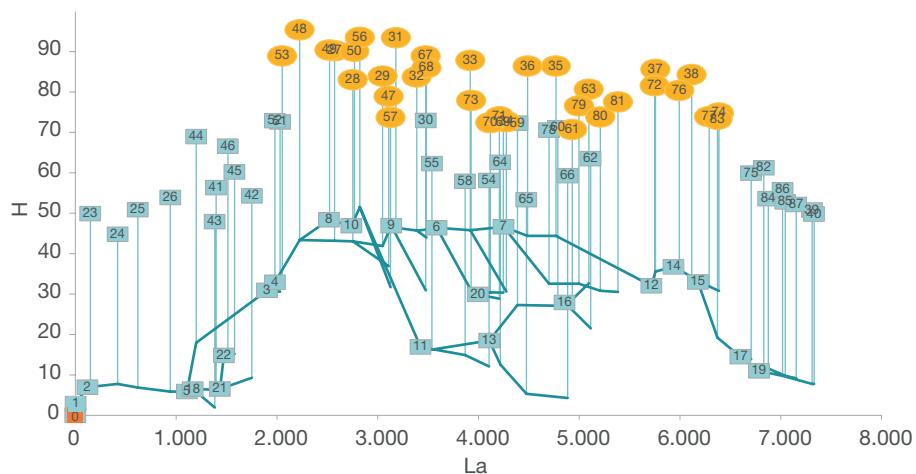
**Gráfico 3b.**

Funcionamiento de la estación de bombeo para mantener la altura de consigna, con los variadores de velocidad instalados (línea gruesa continua) y en el caso de no tenerlos (trazos)

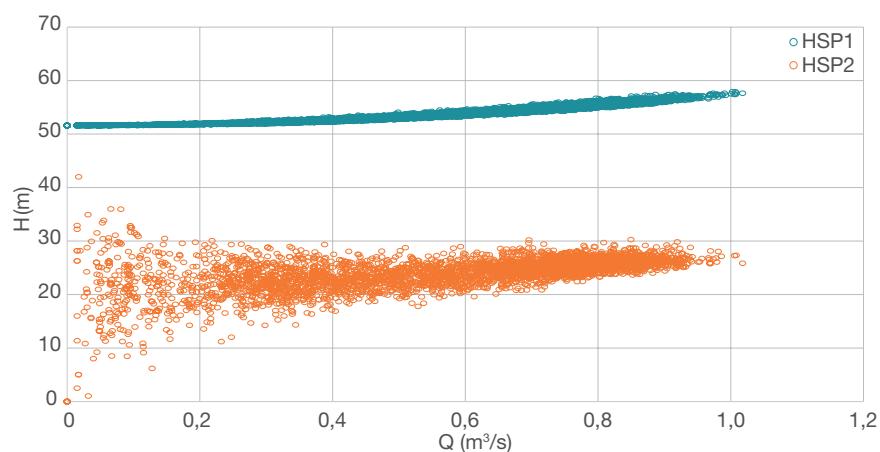


**Gráfico 4.**

Alzado de la red y altura de presión necesaria en cada boca de riego de las del primer turno (círculos amarillos) y del segundo (cuadrados azules)

**Gráfico 5.**

Necesidades de elevación para riego para riego a la demanda para llevar el agua a las bocas con presión (HSP1) y altura media a elevar en parcela (HSP2) en función del caudal Q demandado

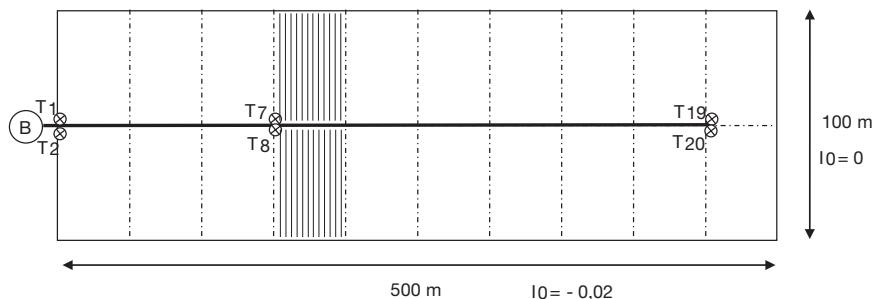


Con esta solución, la potencia de la estación de la comunidad se reduciría casi a la mitad, con el correspondiente ahorro. La inversión adicional del bombeo en parcela podría en parte ser compensado por el ahorro en válvulas hidráulicas y contadores. La falta de energía en muchos puntos podría ser aportada por energía fotovoltaica.

Por tanto, el rebombeo en parcela permitiría un importante ahorro energético. La red del regante es como la de la comunidad, pero en pequeño, aunque con la ventaja de que para ahorrar energía se riegan secuencialmente sus unidades. Así, se adapta el variador a la unidad que esté regándose en cada momento, sin desperdiciar apenas energía. Para ilustrar esto se ha desarrollado un ejemplo de una finca de 5 ha, dividida en 20 unidades iguales, aunque se regarán dos a la vez. Para simplificar se considera que ambas están a la misma cota, a uno y otro lado de la tubería de alimentación (Figura 13). Si la alimentación es fotovoltaica, la mayor subdivisión puede ser favorable en días con menor radiación.

**Figura 13.**

Croquis de finca de regante para ilustrar el ahorro que puede obtenerse equipando al motor de la bomba con un convertidor de frecuencia



Cada unidad dispone de ramales de 16/13,6 mm tendidos a nivel, con goteros compensantes de 2,5 L/h para una presión  $5 < h(m) < 40$ , separados  $s = 0,5$ , y con un coeficiente de variación  $CV_m = 0,04$ . Las pérdidas de carga singulares en los goteros se han caracterizado con una longitud equivalente  $l_e = 0,35$  m. Los ramales, equidistantes cada  $s_r = 1$  m, son alimentados por una tubería de polietileno de diámetro 63/58,2 mm, que está tendida con pendiente adversa  $l_0 = -0,02$ . Las pérdidas de carga localizadas en las inserciones de los ramales se han caracterizado con una  $l_{ear} = 0,15$ . La tubería de alimentación a las unidades se ha supuesto de PVC de 75/70,6 mm (con el caudal de dos unidades  $Q = 25.000$  L/h  $\equiv 0,00694$  m<sup>3</sup>/s, la velocidad resulta  $U = 1,77$  m/s). Las pérdidas de carga en la cabeza (filtros, inyector...) se han considerado 5 m.

Dada la configuración, las bocas más favorables son las dos primeras (en este caso se ha considerado que están a la cota  $z_{T_1} = z_{T_2} \leq 1$  m, con respecto al origen del agua) y las más desfavorables las dos últimas,  $T_{19}$  y  $T_{20}$ , por estar más alejadas (más pérdidas de carga) y encontrarse a más cota ( $z_{T_{19}} = z_{T_{20}} \leq 10$  m). Como resultado del cálculo hidráulico, para regar las bocas  $T_{19}$  y  $T_{20}$  para que la presión mínima en todos los goteros sea al menos de  $h_{min} = 5$  m, se requiere que la bomba suba a  $H = 46$  m. Por ello, se selecciona una bomba con curvas características (SI):  $H = 60 - 290.833 \cdot Q^2$  y  $\eta = 216 \cdot Q - 15.552 \cdot Q^2$ . Puede comprobarse que el punto de funcionamiento ( $Q_B = 25$  m<sup>3</sup>/h,  $H_B = 46$  m) es el de mayor rendimiento,  $\eta = 0,75$ , y que la energía por unidad de volumen resulta  $E/V = 0,167$  kWh/m<sup>3</sup>.

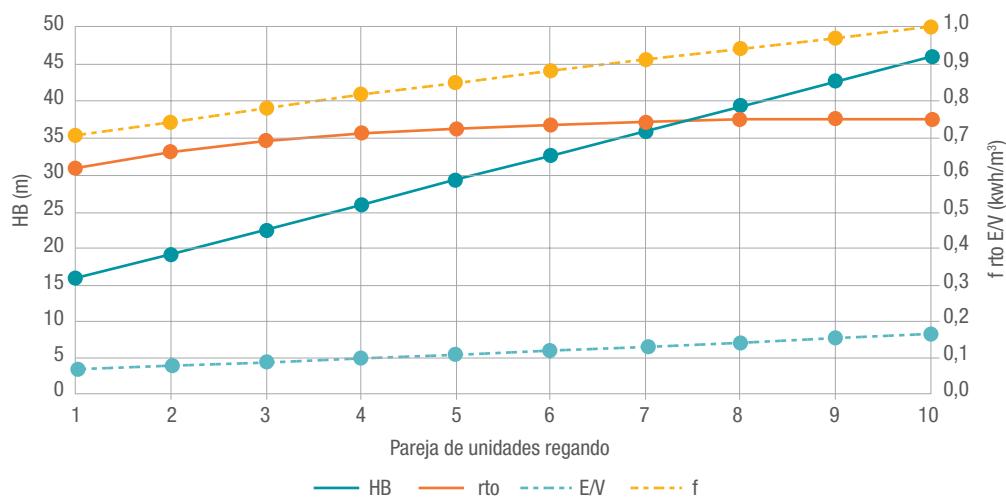
Si a la bomba no se le instala convertidor de frecuencia para modificar la velocidad del impulsor, cuando estén regando el primer par de bocas, el segundo y todos los demás, el caudal de trabajo será  $Q_B = 25$  m<sup>3</sup>/h, la altura de elevación  $H_B = 46$  m, el rendimiento  $\eta = 0,75$  y el consumo energético,  $E/V = 0,167$  kWh/m<sup>3</sup>. El resultado sería independiente de las dos unidades que estén regando. En el caso de ser una boca de riego, la red también debería garantizar una altura de 46 m para que rieguen las dos últimas bocas. En ambos casos, cuando rieguen otras bocas, la energía sobrante se perdería en llaves parcialmente cerradas o en los propios goteros compensantes.

Si la bomba tiene un variador de velocidad, cuando se regaran las dos primeras unidades, la bomba giraría a una fracción de velocidad  $f \leq 0,70$  para elevar únicamente a la altura ahora requerida,  $H_B = 16$  m, y aunque el rendimiento sería algo peor, la energía consumida sería  $E/V = 0,070$  kWh/m<sup>3</sup>, es decir, menos de la mitad del valor anterior. En el resto, cuando estuvieran regando las unidades intermedias se obtienen también resultados intermedios (Gráfico 6).



### Gráfico 6.

Fracción de frecuencia ( $f$ ) sobre 50 Hz, altura de elevación (HB), rendimiento (rto) y energía consumida por unidad de volumen (E/V) en función de la pareja de unidades regando en el caso de equipar y programar a la bomba con un convertidor de frecuencia



El convertidor permitiría ahorrar cuando se estuviera regando en las bocas más próximas, resultando un consumo medio  $E/V_{med} = 0,116 \text{ kWh/m}^3$ . La diferencia,  $0,051 \text{ kWh/m}^3$ , supone un ahorro, con respecto al de no implementar el convertidor del 30 %. Si el consumo son  $5.000 \text{ m}^3/\text{ha}$ , las 5 ha de la finca ahorrarían 1.263 kWh/año.

La solución sería algo menos ventajosa si la finca no tuviese pendiente adversa en la dirección del flujo del agua. Si estuviese a nivel,  $I_0 = 0$ , y mantener las tuberías, se elegiría una bomba que elevase a la menor altura ( $H = 49 - 290.833 \cdot Q^2$ ) con la misma curva de rendimiento. La altura de elevación sería  $H = 35 \text{ m}$  y  $E/V = 0,127 \text{ kWh/m}^3$ , con convertidor se reduciría a  $E/V = 0,091 \text{ kWh/m}^3$ . El ahorro es menor ( $0,036 \text{ kWh/m}^3$ , supone un 28 % por ser las necesidades totales también menores). Si la pendiente está favor y con las mismas tuberías, se elegiría otra bomba con menor altura ( $H = 38,5 - 290.833 \cdot Q^2$ ) con la misma curva de rendimiento. La altura de elevación es  $H = 24,5 \text{ m}$  y  $E/V = 0,094 \text{ kWh/m}^3$ , con convertidor, se reduciría a  $0,072 \text{ kWh/m}^3$ ,  $0,021 \text{ kWh/m}^3$  (ahorro del 23 %).

Se concluye que el convertidor de frecuencia, muy presente en la actualidad en al menos una bomba de la estación, puede ser asimismo interesante en la finca de cada uno de los regantes.

De volver ahora a la red de la comunidad anterior, en la que se necesitaba una altura media de presión en las bocas de 44,4 m, cabe pensar que esta sería un porcentaje de entre el 23 % y el 30 % menos si las fincas son como las de la Figura 13. Esta reducción haría que los HSP2 del Gráfico 5 (puntos naranjas) estuvieran por debajo y el ahorro energético fuese mayor.

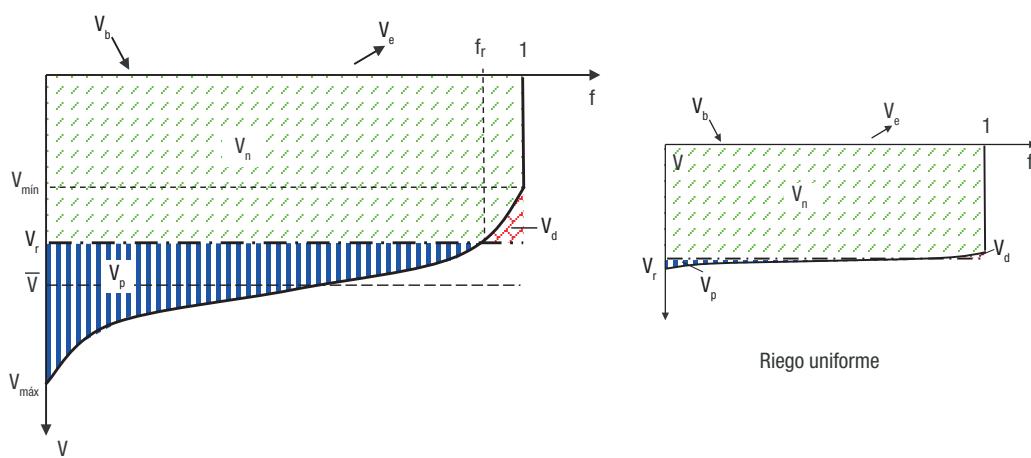
## 3. Eficiencia y productividad de los riegos

### 3.1. Uniformidad y eficiencia de un riego. Riego óptimo

Cuando se aplica un volumen bruto ( $V_b$ ) en una unidad de riego, la mayor parte se infiltra en el suelo, que sirve de almacén de agua y del que se irá alimentando el cultivo. El volumen aplicado ( $V$ ) está condicionado por la capacidad de retención del suelo y debe estar en correspondencia con el que necesita el cultivo hasta el siguiente riego, pero pueden ser distintos según la estrategia. Dado que el agua no se distribuye de forma uniforme, habrá unas plantas que reciban más cantidad y otras menos, siendo, en general, en todos los riegos las mismas plantas las que obtengan más o menos la media. El  $V$  recibido por cada planta puede ser mayor o menor que el deseado ( $V_r$ ). En la Figura 14 se han representado los volúmenes superados por cada fracción de plantas o superficie ( $f$ ). Si  $V > V_r$ , el exceso,  $V_p = V - V_r$ , puede perderse por filtración profunda si la planta no es capaz de absorberlo, aunque podría asimilarlo si se está realizando un riego deficitario, pero en este caso, alterará los objetivos fisiológicos buscados. Por el contrario, si  $V < V_r$ , el déficit,  $V_d = V_r - V$ , seguramente produzca en la planta una reducción en la producción, bien en su cantidad o bien en su calidad. Como consecuencia, interesa conseguir que todas las plantas reciban un volumen próximo al requerido y para ello se necesita que la instalación aplique el agua con uniformidad, siendo una característica primordial de la instalación. En el  $V_r$  podría incluirse una fracción de lavado<sup>8</sup> para mantener la fertilidad del suelo y una adecuada uniformidad. Asimismo, en estrategias de déficit de riego controlado<sup>9</sup> para producir un determinado efecto fisiológico en el cultivo, la uniformidad también es de gran interés para conseguirlo adecuadamente.

**Figura 14.**

Distribución del agua de riego, en relación con el volumen requerido



<sup>8</sup> Obsérvese que tanto con el riego localizado como en el riego por surcos el flujo de agua se produce hacia la periferia, lo que da lugar a la acumulación de sales. Por tanto, ni el riego localizado ni el riego por superficie mediante surcos son métodos adecuados para el lavado de sales, siendo más adecuados aquellos en los que la infiltración es vertical y descendente, dando lugar al desplazamiento de las sales hacia las capas profundas del suelo. También, las lluvias pueden producir redistribuciones no deseables de las sales y, por ello, a veces se riega en estos momentos.

<sup>9</sup> No debe confundirse la lámina de déficit con el riego deficitario controlado. En este último, todo el cultivo es sometido a condiciones de déficit hídrico durante algunos estados fenológicos con criterios agronómicos.



Del volumen aplicado ( $V_b$ ), el volumen neto ( $V_n$ ) o aprovechado para los fines propuestos suele considerarse el infiltrado, que no ha resultado excedentario, y su relación ( $V_n/V_b$ ) suele referirse como rendimiento o eficiencia de aplicación. El  $V_p$  puede provocar retornos, aunque con él también se suelen perder fertilizantes y producir efectos negativos para el medioambiente. Por el contrario, el volumen deficitario ( $V_d$ ) disminuirá la producción y si además es proporcional al déficit, la reducción en términos porcentuales será proporcional al denominado coeficiente de déficit  $C_d = V_d/V_r$ .

Permitiendo más déficit y aplicando menos agua para el mismo periodo entre riegos puede incrementarse el rendimiento, aunque se reduzca la producción. De no desechar filtración profunda, en una estrategia de conservación, el  $V_r$  no debería alcanzar el volumen máximo ( $V_{máx}$ ). Si el agua lleva sales podrían acumularse y sería conveniente realizar lavados, aunque algunos no coincidiesen con los riegos.

En un riego convencional (sin déficit) puede ser más eficiente cuanto mayor sea la uniformidad, pero, en general, resulta más cara. Por ello, conviene analizar hasta qué valor interesa llegar, en cuanto a uniformidad y en cuanto a déficit en las aplicaciones. La solución es compleja, ya que deben contemplarse aspectos como la sensibilidad al estrés hídrico, el valor de reducir la producción, el coste de la instalación y la disponibilidad y coste del agua, entre otras. No obstante, con toda esa información puede realizarse una optimización, siendo resultados de la misma los parámetros que hasta ahora se han considerado independientes (uniformidad y la relación entre  $V_b$  y  $V$ ) y todos los que sean dependientes de ellos. No obstante, algunos valores pueden tener una incertidumbre importante.

Con la función de distribución (Figura 14) o su uniformidad puede estimarse la sensibilidad de la respuesta  $C_d$ - $R_a$ , que asimismo es orientativa. Con frecuencia,  $C_d$ - $R_a$  tiene una pendiente importante al principio, que va disminuyendo progresivamente, por lo que es aconsejable permitir un pequeño déficit y, sobre todo, que no haya exceso de riego en toda la superficie. Las distintas alternativas también deben tener unas expectativas de uniformidad (cuantificada por un coeficiente  $C_u$ , que mida la diferencia de los valores de  $V$  frente a su valor medio  $\bar{V}$ ) y un coste de la instalación, que serán orientativas. En este caso, cabe esperar que la curva  $C_u$ -Coste tenga un crecimiento suave al principio, que se va creciendo progresivamente sin alcanzar la uniformidad perfecta (Gráfico 7).

El  $V_n$ , en el caso de no haber fracción de lavado, es transpirado con el cultivo o evaporado desde el suelo. Su destino es la atmósfera (por cada kg de materia seca, un cultivo puede transpirar entre 100 y 1.000 litros de agua). Del  $V$  también hay una parte que no penetra en el suelo ( $V_e$ ) porque se pierde por escorrentía o por evaporación, siendo de más importancia en el riego por aspersión. De estas pérdidas por evaporación, una parte se podría reducir con la evapotranspiración ( $E_t$ ) del cultivo y del suelo, en cuyo caso no debería considerarse en su totalidad como pérdidas. Para unas condiciones ambientales dadas, la transpiración está muy relacionada con la producción de biomasa. La modificación de dichas condiciones como, por ejemplo, cultivo bajo plástico o cortavientos pueden reducir sensiblemente la  $E_t$ , manteniendo o incluso aumentando la producción, incrementando así la productividad del agua. La respuesta del cultivo al  $V$  de agua se ha considerado en muchos casos lineal hasta un valor máximo<sup>10</sup>. La pendiente de la línea sería una constante para un cultivo dado, aunque puede tener distintos valores en las diferentes fases de desarrollo del cultivo<sup>11</sup> (Figura 15).

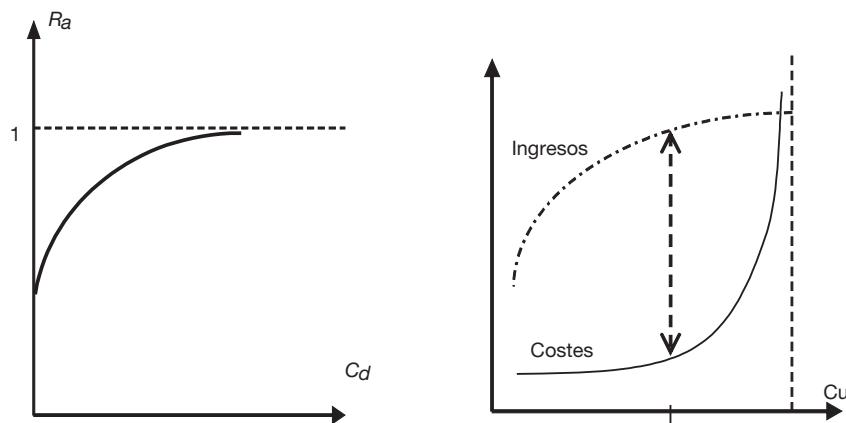
• • • • • • •

<sup>10</sup> DOORENBOS y KASSAM (1979); WARRICK y GARDNER (1983); MARTIN *et al.* (1984) y SAMMIS y WU (1985).

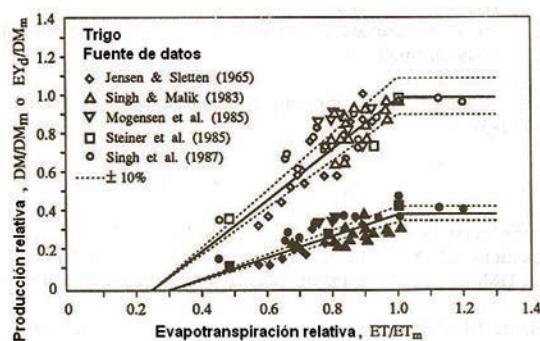
<sup>11</sup> STEDUTO *et al.* (2012).

**Gráfico 7.**

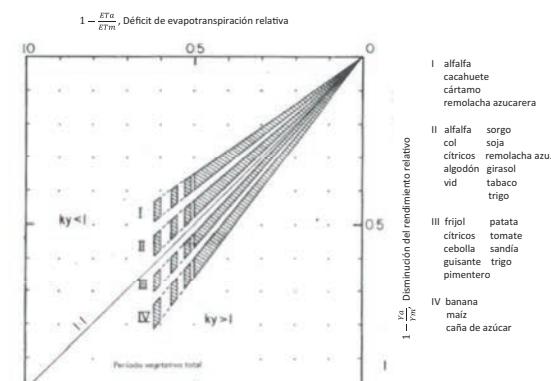
Relación entre rendimiento de aplicación y coeficiente de déficit. Tendencia de costes y beneficios en función de la uniformidad del riego aplicada


**Figura 15.**

Relación de producción lineal en función de la evapotranspiración

**Entre Et y producción**


Fuente: Howell (1990).

**Entre la reducción productiva relativa y la Et relativa**


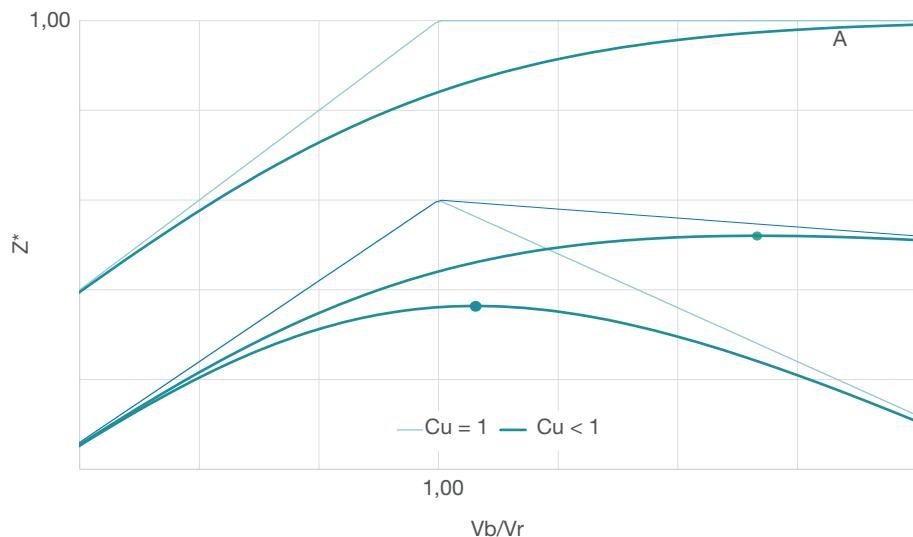
Fuente: Doorenbos y Kassam (1980).

La escasez y encarecimiento del recurso agua, junto con la posible contaminación provocada por los excedentes, deben cambiar la concepción habitual de aplicar riegos para que no se produzca déficit en ningún punto del campo hacia riegos optimizados. En este sentido, Wu *et al.* (2007) definen una función objetivo  $Z$  en la que al valor de la producción  $-Y \cdot P_y$ , producción  $Y(\text{kg})$  por precio unitario de la misma  $P_y$ (euros/kg)– le resta el valor del agua aplicada  $-V_b \cdot C_a$ , volumen  $V_b(\text{m}^3)$  por el precio del agua  $C_a$ (euros/ $\text{m}^3$ ), que puede incluir un coste energético por unidad de volumen– y la pérdida ocasionada por la filtración profunda  $-V_p \cdot C_{fp}$ , volumen  $V_p(\text{m}^3)$  y coste unitario de la misma  $C_{fp}$ (euros/ $\text{m}^3$ )–, optimizando el volumen de agua a aplicar por cada volumen requerido ( $V_b/V_r$ ). En el Gráfico 8, se muestra el comportamiento del retorno relativo, relación entre la función objetivo y el valor de la producción máxima,  $Z^* = Z/(Y_{M_y} \cdot P_y)$  al considerar o no los costes comentados y, asimismo, para riegos perfectamente uniformes ( $C_u = 1$ ) y con uniformidad no perfecta ( $C_u < 1$ ), en este caso, se ha supuesto una distribución normal.



### Gráfico 8.

Relación entre el retorno relativo  $Z^*$  y lámina relativa aplicada,  $Vb/Vr$ , con una función de producción lineal hasta un máximo: A, sin coste del agua ni de la filtración profunda; B, con coste del agua y C, con coste del agua y de la filtración profunda



Inicialmente, al aumentar el volumen de agua por cada unidad requerida ( $Vb/Vr$ ), se reduce el déficit y con ello crece la producción y el retorno  $Z^*$ . Llega un momento que a este coste se le suma el del propio del agua –cuando empieza a haber pérdidas por filtración profunda– y el déficit comienza a reducirse. Como consecuencia,  $Z^*$  alcanza el máximo y empieza a disminuir. El volumen óptimo de agua por unidad requerida es menor al crecer el coeficiente de uniformidad, considerando los costes de filtración profunda y, en menor medida, el coste del agua. Si la uniformidad es perfecta (líneas rectas en el Gráfico 8), el óptimo se produce para  $Vb/Vr = 1$ . Es importante la uniformidad para hacer riegos eficientes (con mínimo déficit y sin pérdidas por filtración profunda) y depende fundamentalmente de la instalación, aunque no hay que olvidar su adecuado mantenimiento, aspecto destacable por las difíciles condiciones de campo.

La introducción en el coste del agua ( $C_a$ ) al aplicarle la energía necesaria, es decir,  $C_a' = C_a + E_v \cdot C_{ue}$ , –siendo,  $E_v$  (kWh/m<sup>3</sup>) la energía a aplicar al agua y  $C_{ue}$  (euros/kWh) el coste unitario de la energía– obtendría una optimización que sería, además del volumen a aplicar, la altura de energía a disponer en cabeza de la unidad  $H_0$  y, si la uniformidad del riego depende de la energía en cabeza, sería también esta uniformidad un resultado de la optimización<sup>12</sup>.

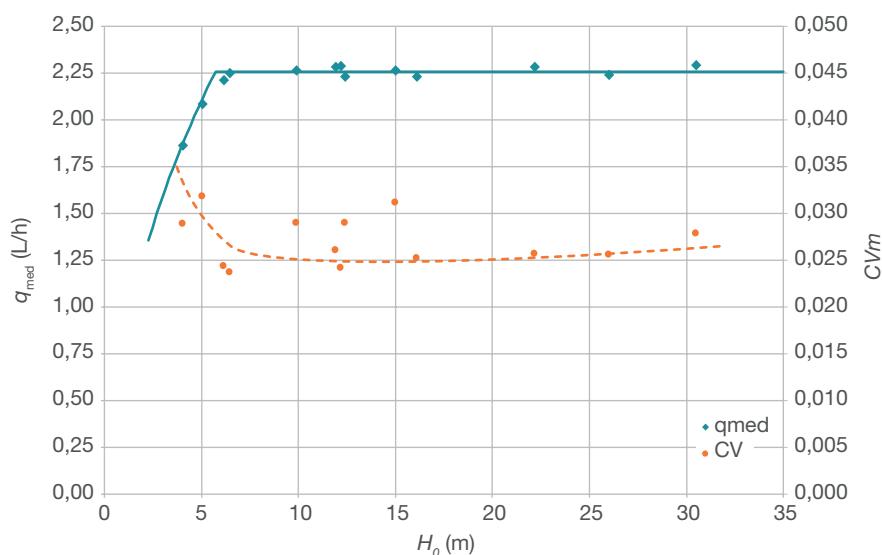
Es conveniente saber la respuesta de las unidades según la energía a disponer en cabeza, aspecto que no suele conocerse. En el Gráfico 9 se muestran los resultados experimentales obtenidos en una unidad de riego con goteros compensantes en un rango de presiones entre 4,1 y 41 m. Puede observarse que el caudal y la uniformidad no varían a partir de  $H_0 = 6,25$  m, es decir, no tiene ninguna ventaja que trabajen a más presión y, sin embargo, suelen hacerlo a unas bastante mayores.

• • • • • • •

<sup>12</sup> JUANA y SÁNCHEZ (2022) y CHAMBA *et al.* (2019).

**Gráfico 9.**

Caudal medio  $q_{med}$  y coeficiente de variación  $CV_m$  en función de la altura de presión en cabeza en una unidad, con cultivo de vid y goteros compensantes



Fuente: Chamba *et al.* (2019b).

El comportamiento mostrado en el Gráfico 9, junto con otros valores, es general en unidades con emisores compensantes. Su determinación experimental es algo costosa, pero se simplifica si con alguna evaluación en campo se completa con la simulación matemática. Un comportamiento algo más complejo se obtiene con emisores no compensantes, aunque también puede ser conocido.

A la posible afección ambiental de la filtración profunda es necesario dedicarle más atención tanto de investigación como de soluciones técnicas, junto con el acompañamiento normativo europeo, que abordan temas como los contenidos de nutrientes que deben tener los fertilizantes y plaguicidas, como a su forma de aplicación y cantidades máximas, sobre todo, en las zonas declaradas y cartografiadas como vulnerables. Asimismo, en los planes hidrológicos de cada demarcación hidrográfica se establecen dotaciones límite para el riego, distinguiendo cultivos y sistemas de explotación. Además de las cantidades aportadas en correspondencia con las absorciones del cultivo y el control de los contenidos en el suelo, es necesario controlar y programar los efluentes para evitar al mínimo las salidas de elementos como nitratos, muy solubles. Por otra parte, cuando se riegue con agua con una concentración de sales apreciable es necesario realizar lavados para mantener la fertilidad del suelo. Aspecto este último que, en ocasiones, parece que se está olvidando.

### 3.2. Uso, consumo y pérdidas según el ámbito espacial de planificación

El agua es un compuesto químico bastante estable y, en términos cuantitativos, la masa de agua en el conjunto del planeta Tierra puede considerarse casi invariante en el tiempo. Como consecuencia, puede decirse que no se consume, sino que cambia de lugar y de calidad.



El agua consumida (transpirada por el cultivo o evaporada del suelo) no desaparece, si no que aumenta el contenido de humedad del aire, haciéndolo menos denso y con mayor tendencia a la elevación, favoreciendo así la creación de una situación de inestabilidad atmosférica, que produce de nuevo su precipitación. Por término medio, el tiempo de permanencia o de renovación del agua en la atmósfera es pequeño (8,2 días)<sup>13</sup>. La circulación del aire determina el lugar en el que se produce la precipitación. Desde un punto de vista territorial, se ha observado que el regadío incrementa las lluvias, mientras que las deforestaciones la reducen<sup>14</sup>. De esta forma, si los vientos ocasionan que la precipitación fuese en la cabecera de la cuenca, podría considerarse que vuelven a la misma demarcación hidrográfica. Es de interés mejorar el seguimiento del vapor de agua para valorar efectos secundarios o indirectos, que actualmente no son considerados. Así, trabajos analíticos, con ideas como las de Ribera *et al.* (2008), pueden servir de orientación. Por otra parte, herramientas matemáticas como las de 'Network Environ Analysis' para investigar las relaciones y los intercambios entre los sistemas que integran una unidad territorial, considerando los efectos directos e indirectos y, en particular, el uso de matrices de transferencias entre las masas de agua como las de Paten (1991) o Fath y Patten (1999) parece que pueden ayudar a estudiar y cuantificar el complejo problema.

En la Figura 16 se han representado los volúmenes y flujos de agua. Se observa que una parte de la precipitación ( $119 \cdot 10^6$  km<sup>3</sup>/año) se debe a la evapotranspiración ( $72 \cdot 10^6$  km<sup>3</sup>/año). En el mismo sentido, los recursos naturales suelen valorarse como la precipitación menos la Et, así, por ejemplo, se hace en el *Libro Blanco del Agua*<sup>15</sup>. La reducción de la Et con una deforestación puede ser negativa para los recursos hídricos, ya que, además de disminuir la precipitación, puede afectar en la conservación del suelo de forma desfavorable y, como consecuencia, aumentar la escorrentía, que haría que el agua precipitada, si no es embalsada, volviera rápidamente al mar y fuese más difícil usarla que cuando se infiltra y vuelve lentamente, manteniendo los caudales de los ríos más uniformes en el tiempo. Volviendo a la zona regable, junto con las pérdidas en las unidades de riego, se producen pérdidas en el sistema de distribución tanto del regante como de la comunidad. A las fugas y filtraciones hay que añadir la evaporación desde las balsas o desde las conducciones libres y, sobre todo, en estas últimas, las descargas operacionales.

Los conceptos de eficiencia y pérdidas, vistos en una unidad de riego, pueden no reflejar adecuadamente el aprovechamiento del agua. El mismo concepto de pérdida debe ser matizado para no resultar engañoso. Así, en el sistema tradicional de riego por superficie representado en la Figura 1 del apartado de Introducción, la relación entre las necesidades hídricas de los cultivos de la zona regable y el volumen derivado por el caz se ha usado para estimar la eficiencia del uso del agua<sup>16</sup>. El valor resultante, seguramente bajo, incita a pensar en un mal aprovechamiento de los recursos. En gran medida se deberá al agua derivada y no usada, que por el propio caz vuelve al cauce aguas abajo de la zona regable. En el caso de que el caudal derivado, que luego retorna, no tenga un efecto ecológico significativo en el tramo de cauce natural, que va desde la derivación al retorno, hay razones para defender que estas pérdidas no deban ser consideradas o que el retorno sea tenido en cuenta. El programa de desembalses de la presa lo contemplará y otro sistema aguas abajo puede usarla.

• • • • • • •

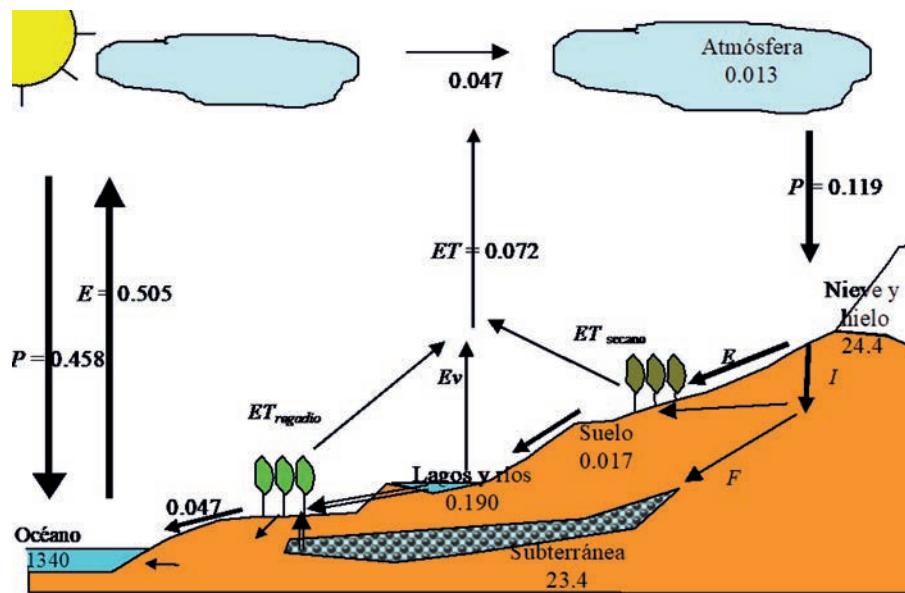
<sup>13</sup> CHOW *et al.* (1988).

<sup>14</sup> GATES y LIEB (2001) y BONAN (2002).

<sup>15</sup> LBA (1998).

<sup>16</sup> KRINNER *et al.* (1994).

**Figura 16.**

 El ciclo del agua. Volúmenes ( $\text{km}^3$ ) y flujos medios de agua en la Tierra. En millones de  $\text{km}^3/\text{año}$ 


Fuente: adaptado de UNESCO (1978).

Del agua derivada y usada, un porcentaje importante —que no debería superar el 20 %, pero que con frecuencia llega el 40 y 50 %— se pierde por filtración profunda en los canteros. En la valoración de las pérdidas por filtración profunda, un aspecto determinante son los componentes que acompañan al agua y la presencia aguas abajo de masas en las que puedan causar una afección negativa. Esta pérdida que entra en el subsuelo podrá ser un recurso aguas abajo. En consecuencia, aunque el análisis realizado es simplificado, el uso que está haciendo el sistema de explotación puede ser bastante más satisfactorio que el que podría indicar de forma aislada el índice apuntado.

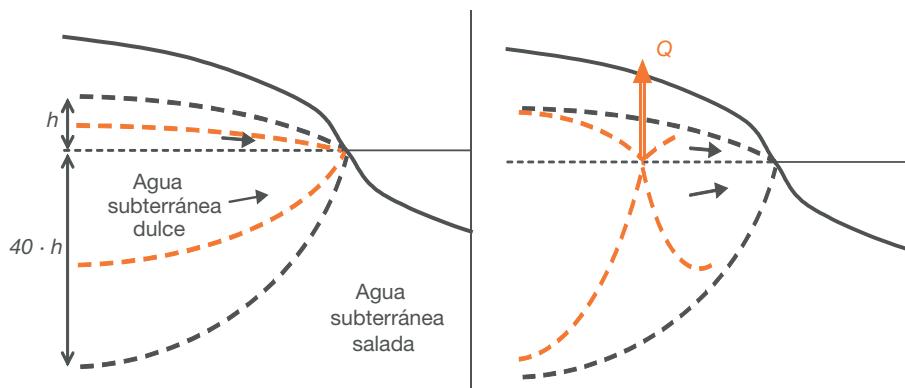
Los sistemas tradicionales se caracterizan por usar más agua que la que aprovechan y por emplear más mano de obra. Esto determina que bien por falta de dotación y/o bien por falta de disponibilidad de mano de obra, la superficie simultánea con cultivos en el periodo punta sea sensiblemente menor a la total.

En las zonas próximas a la costa, el agua que se pierde por filtración profunda no puede ser usada aguas abajo y, sin embargo, puede ser útil. El flujo al mar de los acuíferos costeros es cuantitativamente pequeño, pero su reducción aumenta considerablemente la intrusión marina y reduce los caudales que se pueden extraer en los pozos (Gráfico 10). La diferencia de densidades del agua dulce, con respecto a la salada, determina que por cada metro que desciende el nivel piezométrico  $h$ , se reduce 40 m la profundidad de la interfase que las separa, aproximadamente. Permitir un incremento de las pérdidas al mar puede aumentar considerablemente la capacidad de los acuíferos costeros y con ello las facilidades para su explotación.



### Gráfico 10.

Efecto de una reducción del flujo subterráneo al mar y de la extracción de un caudal  $Q$



En general, la modernización de regadíos transforma estos sistemas de riego por superficie a riegos a presión. La relación entre agua consumida y usada se incrementa y las necesidades de mano de obra se reducen. Para amortizar los costes de las instalaciones, los agricultores aumentan el porcentaje de superficie simultánea con riego con cultivos más productivos, propios del regadío, a costa de los típicos de secano. Así, puede aumentarse el consumo de agua y reducir los recursos aguas abajo de la zona regable. En otros lugares para evitar una subida del consumo, conviene condicionar la modernización a la reducción de dotaciones.

Una valoración distinta de las modernizaciones en zonas como las de la Figura 14 se produce en los sistemas de explotación con recursos escasos para la demanda existente. Aquí, aunque no se reduzca el consumo, al disminuir el agua usada por el regadío, puede ser destinada a usos alternativos con mayor valor añadido. La modernización de los regadíos permitiría satisfacer una demanda, que inicialmente no era posible.

Desde el punto de vista de la sostenibilidad hay que tener presente que el regadío es una superficie de evaporación y que el vapor de agua desprende sales y otras sustancias contaminantes, por lo que tenderá a su acumulación si no se procede a su eliminación o lavado programado, además se deben prever las consecuencias de lavados no programados producidos por tormentas. En este sentido, se hace necesario controlar y hacer un seguimiento del agua, así como de las cantidades y de los productos aplicados. También hay que tener presente que el flujo en el medio poroso, sobre todo, si es en subsaturación, puede ser muy lento. Aspecto que puede tener ventajas con contaminantes que se degradan con el tiempo, pero que pueden contribuir a que los problemas originados se trasladen a generaciones futuras. Finalmente, hay que indicar que la contaminación es, en muchas ocasiones, cuestión de disolución y la disminución de retornos, seguramente, irá acompañada con un incremento de la concentración de contaminantes.



### 3.3. Ejemplo para la reflexión sobre uso, pérdidas y consumo de agua

Para exemplificarlo, vamos a suponer el siguiente sistema:

Sea una porción de superficie del planeta completamente aislada<sup>17</sup> y sea el aire de referencia de la Atmósfera Estándar Internacional con un gradiente térmico  $\alpha = -6,5 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ , que si está subsaturado, resultará estable<sup>18</sup> y si está saturado, será inestable<sup>19</sup>. Considérese una temperatura del aire en superficie en torno a los  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$  para que, con una distribución hidrostática de presiones, resulte una capacidad de almacenamiento de vapor de agua en saturación de unos 55 mm y que además en cada proceso de precipitación se descargan 30 mm (se supondrá que los 15 mm primeros se infiltran en el suelo y los otros 15 mm escurren hacia el punto más bajo, donde una balsa los recoge para aportar el agua de nuevo al suelo mediante riego). También, que el cultivo, en las condiciones dadas, tiene una Et media de 3 mm/d, que será igual todos los días año, lo que hace un total anual de  $1.100 \text{ mm} \equiv 11.000 \text{ m}^3/\text{ha}$ , 550 mm provenientes de la lluvia y otros tantos del riego. Asimismo, que tiene una producción con un contenido de agua en ella de  $110 \cdot 10^3 \text{ kg/ha/año} \equiv 11 \text{ mm/año}$ .

Llovería 30 mm cada 10 días y, entre dos lluvias, serían de nuevo evapotranspirados por el conjunto suelo-cultivo. Es decir, el cultivo usaría la misma agua cada 10 días. De la evapotranspirada, el 1 % iría a la producción. Este agua fijada y transformada en glucosa en la fotosíntesis, con la energía radiante, se desprendería después de la respiración celular de los organismos que se alimentan del cultivo y que, para simplificar, se incluye también en la evapotranspiración. La única diferencia con la transpirada por el cultivo es que esta volvería a la atmósfera después de una campaña y llevaría un desfase, es decir, de los 30 mm que caen, 29,70 mm pasan por la planta cada 10 días y los 0,30 restantes lo harían en un año.

Por tanto, se observa que la masa de agua con la que podría funcionar este sistema imaginado sería relativamente pequeña. Los 55 mm de la atmósfera, junto con los de reserva del agua en el suelo, y la movilización de los 15 mm con riego haría que el cultivo produjera  $110 \cdot 10^3 \text{ kg/ha/año}$ . Si el agua que escurre hasta la balsa deja de rebombarse para el riego, se alcanzaría otro equilibrio, donde el agua en circulación se reduciría, tardaría más tiempo en saturarse la atmósfera y provocar la precipitación. Si la precipitación sigue siendo de 30 mm (15 van a la balsa y otros 15 al suelo), los 15 mm que deben evaporarse de la balsa tardaría mucho tiempo por su pequeña superficie relativa. El cultivo de secano solo evapotranspiraría lo que se infiltra en el suelo (15 mm), pero en un periodo más dilatado y, por tanto, se reduciría la producción. La ventaja sería que la balsa tendría más agua.

También se puede añadir un acuífero, que se recargaría lentamente con el agua del suelo que fuera a filtración profunda y que, si no está en comunicación con la balsa, alimentándola, se debería rebombar, porque si no, toda el agua del sistema acabaría en él. De nuevo, sin movilización, no habría producción, tampoco Et, ni precipitación.

<sup>17</sup> Para cuantificarla se darán valores por unidad de superficie o se supondrá que la superficie es 1 ha.

<sup>18</sup> El gradiente adiabático seco es  $\Gamma = -10 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km} < a$ .

<sup>19</sup> El gradiente seudoadiabático saturado es  $\Gamma^o > a$ , al menos, en la parte inferior de la columna de aire.



Aquí, los conceptos de consumo de agua o de huella hídrica que suelen emplearse, no parecen muy adecuados, ya que representa una situación extrema, pero quizás no demasiado alejada de la realidad. El conjunto de la Tierra sería un sistema más grande y más complejo, con distintos datos y, sobre todo, con heterogeneidades espaciales y temporales. En algunas porciones superficiales como en zonas ecuatoriales habría similitudes, aunque no están totalmente aisladas y hay flujos entrantes y salientes. En nuestras latitudes, además de las precipitaciones convectivas comentadas, se producen otras ciclónicas y orográficas.

Los océanos son una superficie con una influencia determinante, ya que alimentan a la atmósfera con agua que luego precipita en el continente, pero según los datos del Gráfico 10, este flujo representa algo menos del 40 %, por tanto, el 60 % restante sería de la propia Et. Así, es fundamental tener esto en cuenta, pues su efectos indirectos, aunque son complejos de determinar, son importantes.

Entre las conclusiones del estudio de Ribera *et al.* (2008) de este proceso de reciclado para la cuenca del Guadalquivir están:

- Es un aporte esencial de humedad (Et desde la propia cuenca). El resultado de esto era esperado, pero no la dimensión obtenida, con un orden de magnitud similar al de todo el Atlántico subtropical.
- Es importante durante todo el año, pero especialmente en primavera y verano. Esto pone de relieve la importancia de la desertificación de la cuenca para las precipitaciones. El hecho de que durante este periodo más cálido la cubierta vegetal sea menor, limita enormemente la Et desde la superficie terrestre y reduce la formación de lluvias sobre la cuenca. Son necesarios más estudios (especialmente de evolución de tipo de cubierta vegetal y del uso del suelo en la cuenca del Guadalquivir y alrededores) para llegar a conclusiones definitivas, ya que la evolución de las precipitaciones son de gran importancia.
- El mar Mediterráneo es una fuente de humedad secundaria anual (en comparación con el Atlántico y el reciclaje). No obstante, aumenta sus aportes en verano y, en particular, está relacionado con la precipitación moderada y extrema en la región más oriental de la cuenca del Guadalquivir. Cabe destacar que este mar no solo actúa como fuente de humedad, sino que se han detectado aportes importantes desde zonas terrestres del norte de África.

En resumen, se han ilustrado algunos conceptos razonables, para los fines previstos, que pueden dejar de serlo si se usan sin cuidado en otros escenarios más amplios. La producción de biomasa y, en especial, de los cultivos agrícolas se relaciona, a veces, proporcionalmente con la transpiración. Una misma molécula de agua puede ser transpirada varias veces a lo largo de una campaña, aunque sea en distintos lugares, ya que la renovación del vapor de la atmósfera se produce varias veces al mes. Por tanto, hay que considerar que el agua movilizada para el regadío, además de incrementar la producción, contribuye a aumentar la precipitación, lo que puede tener un efecto multiplicador global. Además, del seguimiento del agua en el suelo y del vapor de agua en la atmósfera y, en un futuro, su control son aspectos claves para mejorar el aprovechamiento de los recursos hídricos.



## 4. Uso de agua y consumo de energía en España. Modernizaciones

A finales del siglo pasado, tras la Ley de Aguas de 1985 para la preparación del Plan Hidrológico Nacional<sup>20</sup> y del Plan Nacional de Regadíos<sup>21</sup> se hizo un importante esfuerzo, que se materializó en el *Libro Blanco del Agua (LBA)*<sup>22</sup>, en el que se analizó la situación de los recursos hídricos nacionales y su posible aprovechamiento. Posteriormente, la Directiva Marco del Agua (DMA)<sup>23</sup> ha obligado a completar y analizar aspectos concretos sobre la situación, protección y mejora de las masas de agua existentes, con objeto de lograr su buen estado.

Además de los documentos mencionados y sus posteriores modificaciones, los sucesivos planes hidrológicos de cuenca o de demarcaciones hidrográficas presentan una información minuciosa y detallada de los recursos hídricos, pero más dispersa y menos homogénea que la presentada en el *LBA*, aunque en algunos aspectos no esté del todo actualizada. También caben destacar los Informes de seguimiento de los planes hidrológicos de cuenca y de los recursos hídricos (SPHCYRH, 2017-2021) y los documentos: «Síntesis de los planes hidrológicos españoles. Segundo ciclo de la DMA (2015-2021)» y Síntesis de los borradores de planes hidrológicos de las demarcaciones hidrográficas intercomunitarias (revisión para el tercer ciclo, 2022-2027), ambos de la Dirección General del Agua (DGA) con la colaboración del Centro de Estudios Hidrográficos (CEH).

El MAPA realiza todos los años la «Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos (ESYRCE)» y elabora informes sobre sectores, entre los que destaca el «Análisis de los Regadíos Españoles (ESYRCE\_R)». El Instituto Nacional de Estadística (INE), en la 'Encuesta sobre el uso del agua en el sector agrario (INE\_EUASA)' facilita la consulta y uso de la información que está organizada por comunidades autónomas, provincias y cultivos. Aspecto diferencial, con los datos de los recursos hídricos (por demarcaciones y, dentro de estas, por sistemas de explotación). Esta circunstancia dificulta la obtención de datos cruzados como, por ejemplo, el de los volúmenes de agua usados por unidad de superficie o como la producción obtenida por unidad de volumen de agua aplicada. Por ello, en estos casos, normalmente se recurre a trabajos específicos publicados. Esta situación de dificultad se acentúa cuando se hacen intervenir precios para obtener márgenes unitarios.

### 4.1. Recursos hídricos y uso del agua

Según el *LBA* (1998), la precipitación anual media española sobre una superficie supone un volumen precipitado de 346 km<sup>3</sup>. De dicho volumen, el 68 % regresa a la atmósfera por Et y el resto corresponde a la aportación o recurso natural R<sub>N</sub>. Para una cuenca, sin entradas ni salidas de trasvases, la precipitación menos la Et es la aportación a la red fluvial, que se tiene en cuenta

• • • • • • •

<sup>20</sup> PHN (2000).

<sup>21</sup> PNR (2001).

<sup>22</sup> LBA (1998).

<sup>23</sup> DMA (2000).



como recurso natural<sup>24</sup>. Se distingue la escorrentía superficial (E), que desde la lluvia escurre por la superficie y va directa a ríos y lagos 82 km<sup>3</sup> (24 %), que por infiltración (I) y posterior filtración recarga los acuíferos 29 km<sup>3</sup> (8,4 %). La recarga, casi en su totalidad, vuelve de nuevo a la red fluvial y forma lo que se conoce como componente subterránea (27 km<sup>3</sup>), que es alrededor del 25 % de la aportación de nuestros ríos. La transferencia subterránea directa al mar es pequeña, 2 km<sup>3</sup>. Las diferencias entre regiones son importantes y se acentúan al ser las zonas con menos recursos las que tienen mayores necesidades (Tabla 1).

**Tabla 1.**

Balance de agua en España por ámbitos territoriales

Ámbito	Superficie		Precipitación		Evotranspiración		Aportación natural, recursos naturales	
	A (km <sup>2</sup> )	P (mm)	CV <sub>P</sub>	ETP (mm)	ET (mm)	R <sub>N</sub> ≡ E+I = P-ET (mm)	CV <sub>RN</sub>	
Norte y Galicia	53.780	1.429	0,18	696	608	821	44.157	0,08
Duero	78.960	625	0,21	759	452	173	13.660	0,47
Tajo	55.810	655	0,23	898	460	195	10.883	0,56
Guadiana	60.210	537	0,26	988	447	91	5.475	0,81
Guadalquivir	63.240	591	0,28	991	455	136	8.601	0,77
Sur	17.950	530	0,27	969	399	131	2.351	0,71
Segura	19.120	383	0,26	963	341	42	803	0,36
Júcar	42.900	504	0,21	881	424	80	3.432	0,34
Ebro	85.560	682	0,16	792	472	210	17.967	0,29
C. I. Cataluña	16.490	734	0,22	792	565	169	2.787	0,54
Baleares	5.010	595	0,23	896	463	132	661	0,63
Canarias	7.440	302	0,33	1.057	247	55	409	0,72
<b>España</b>	<b>506.470</b>	<b>684</b>	<b>0,17</b>	<b>862</b>	<b>464</b>	<b>220</b>	<b>111.186</b>	<b>0,35</b>

Fuente: *Libro Blanco del Agua*.

Las variaciones anuales tienen su importancia. En el *LBA* para su caracterización se usa el coeficiente de variación CV (desviación típica dividida por la media). Así, de ajustar los datos a distribuciones normales, la media y el CV serían suficientes para estudios de probabilidad aproximados. Este ajuste hay que considerarlo con ciertas reservas, dado que se ha observado que los períodos de años secos suelen ser más largos que los húmedos.

En la Tabla 1 se observa que al pasar de España a un ámbito territorial menor, aumentan los CV, y que los CV de las aportaciones son mayores que los de las precipitaciones. La reducción de la precipitación se traslada sustancialmente a la aportación, pues la Et, condicionada por la demanda atmosférica y amortiguada por la humedad del suelo, cambia en mucha menor medida. Además del tamaño, el resto de características tienen su influencia, pues puede observarse que el CV de las aportaciones naturales de las cuencas del Guadiana y del Guadalquivir, relativamente grandes en superficie, es más alto de lo esperado.

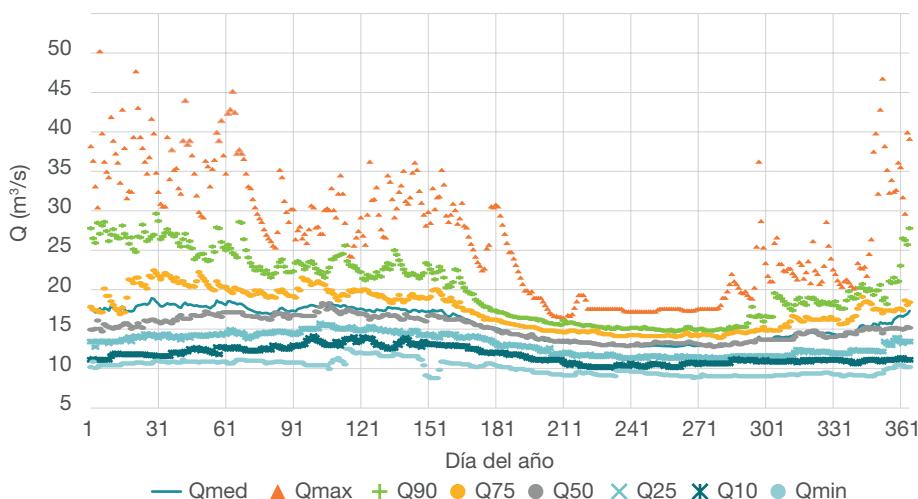
• • • • • • •

<sup>24</sup> Al considerar tiempos largos, las diferencias de agua almacenada en acuíferos tienen poca influencia.

La distribución de las aportaciones a lo largo del año, menor cuando la demanda es mayor, determina la conveniencia de regular. Para la gestión es conveniente conocer la probabilidad de que una aportación sea superada. En el Gráfico 11 se recoge el caudal medio diario y los percentiles correspondientes a 40 años (de 1970 a 2010) del río Tajo en la estación de Trillo.

**Gráfico 11.**

Caudal medio (línea) y percentiles (puntos) de caudal del río Tajo en Trillo (1970-2010)



Fuente: datos diarios de la estación. Elaboración propia.

La evaluación de recursos hídricos en régimen natural constituye una información básica de partida para el proceso de planificación hidrológica y son determinados con el modelo de simulación de precipitación-aportación, SIMPA<sup>25</sup>. Con él se han generado unos datos mensuales desde 1941 a la actualidad, en cada cuadrado de 500 x 500 m<sup>2</sup> de territorio español. Así, están disponibles tanto las series de precipitaciones, temperaturas medias y Et potencial como de los resultados obtenidos (Et potencial y real; escorrentía superficial, subterránea y total; aportación en la red de drenaje; humedad del suelo e infiltración). Cabe recalcar que en lo que se refiere a aportaciones son las que habría en régimen natural, no afectado por el hombre, más allá de la influencia que haya tenido en los datos de entrada. Por tanto, las aportaciones no son las reales, ya que están bastante afectadas (Gráfico 12).

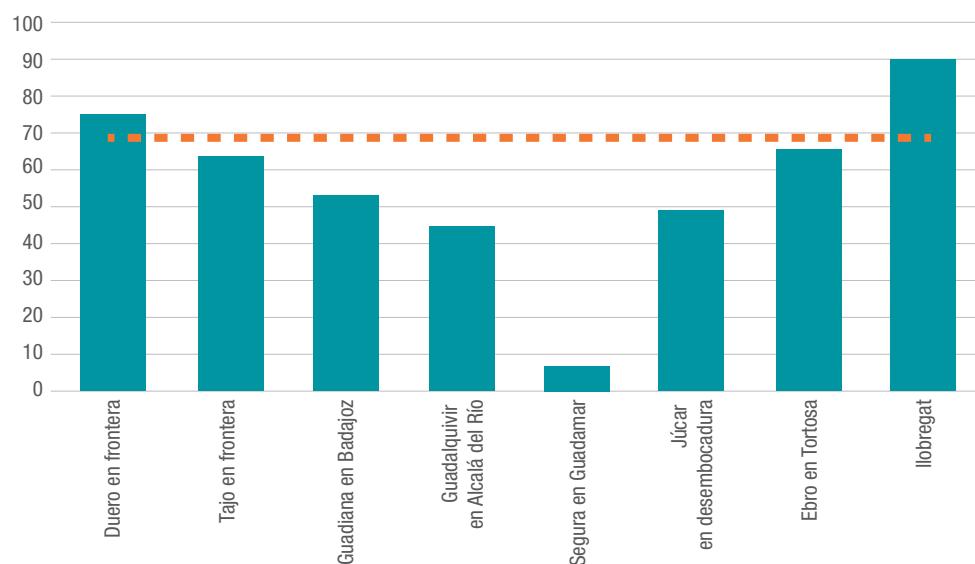
Hay una importante preocupación sobre cómo pueden cambiar en el futuro los recursos hídricos. En el documento «Evaluación de recursos hídricos en régimen natural en España (1940/41-2017/18)<sup>26</sup> se comparan los datos de precipitación de toda la serie 1940/41-2017/18 (a la que se le denomina serie larga, SL), frente a la última mitad de 1980/81-2017/18 (serie corta, SC). Las diferencias porcentuales se muestran en la Figura 17a, donde se observa que zonas como el alto Tajo han sufrido reducciones que superan el 10 %. A escala global, para España resulta una disminución del 3,33 %, de los 660 mm de precipitación media para toda la serie, se reducen a 638 mm en el último periodo.

<sup>25</sup> ESTRELA y QUINTAS (1996), RUÍZ (1999), ESTRELA *et al.* (1999), ÁLVAREZ *et al.* (2005) y CEDEX (2020).

<sup>26</sup> CEDEX (2020).

**Gráfico 12.**

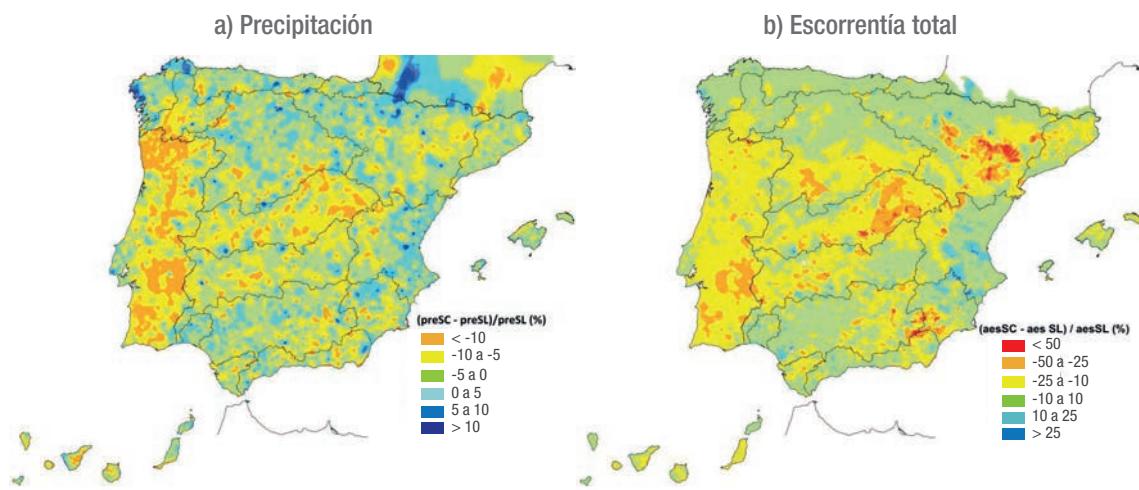
Relación entre la aportación real y natural de los principales ríos españoles En porcentaje



Fuente: LBA (1998).

**Figura 17.**

Porcentaje de cambio de la precipitación anual y de la escorrentía total anual en España, serie corta (SC) vs. serie larga (SL)



Fuente: CEDEX (2020).

Las temperaturas no han cambiado de forma significativa –ni espacial, ni temporal– a lo largo del año. La Et potencial ha tenido un pequeño aumento, pero para la Et real una ligera disminución. La escorrentía total generada (superficial más subterránea) se ha reducido por la menor precipitación (Figura 17b). Para toda la serie, el valor medio de 214 mm pasa a 201 mm para la SC (-6 %). Y, además de la zona del alto Tajo, en la zona medio-baja del Ebro se han tenido reducciones mayores del 50 %.

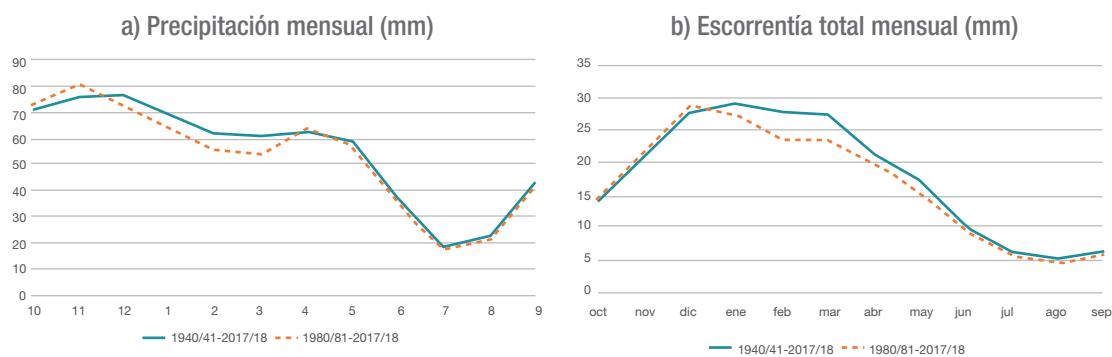
La variación a lo largo del año se muestra en el Gráfico 13a y 13b para la precipitación y la escorrentía total, respectivamente. Habría aumentado ligeramente los meses de octubre y noviembre, y habría disminuido los meses de enero, febrero y marzo. Conviene recordar que es un modelo con valores simulados sobre un régimen natural que no existe, lo que le puede dar mayor incertidumbre a la calibración y contrastes realizados y, por tanto, a los resultados.

El LBA denominó a los ‘recursos potenciales’ como los resultantes de restar a los recursos naturales los requerimientos ambientales (caudales ecológicos) o de carácter social (servidumbres) o geopolíticos (Convenio de Albufeira con Portugal). Además, por existir también restricciones de carácter técnico o económico, que limitan su aprovechamiento, nombró ‘recursos renovables’ a los realmente disponibles o que pueden ser movilizados para abastecer una demanda. Al hablar de demanda se contempla, en su caso, su distribución mensual y un nivel de garantía exigible para su suministro. En este sentido, se acepta hasta un déficit anual acumulado del 50 %, 75 % y 100 % de la demanda anual para 1, 2 y 10 años, respectivamente. Asimismo, se contemplan como recursos los retornos de las demandas que son calculados en función de sus propias características.

La Instrucción de Planificación Hidrológica<sup>27</sup>, a efectos de planificación, reduce estas aportaciones naturales para incorporar el efecto del cambio climático (Tabla 2). Dichos valores cabe esperar que se vayan redefiniendo con el paso del tiempo.

### Gráfico 13.

Serie de promedios mensuales de la precipitación y de la escorrentía total en España  
(1940/41-2017/18 vs. 1980/81- 2017/18)



Fuente: CEDEX (2020).

• • • • • • • •

<sup>27</sup> IPH (2008).

**Tabla 2.**

Disminución de la aportación natural a considerar por el cambio climático

Demarcación hidrográfica	Disminución (%)
Miño-Sil	3
Cantábrico	2
Duero	6
Tajo	7
Guadiana	11
Guadalquivir	8
Segura	11
Júcar	9
Ebro	5

Fuente: IPH (2008).

La definición de caudal ecológico, por afectar a la disponibilidad de recursos, es un tema sensible que irá mejorando progresivamente. Actualmente, siguiendo la IPH, suelen considerarse como referencia entre el 5 % y el 15 % de los recursos naturales mensuales (calculados con el modelo SIMPA)<sup>28</sup>. En la Tabla 3 se recogen los resultados de este trabajo (simulación para 2018/2019). El resultado muestra los recursos disponibles sin regulación (8,8 km<sup>3</sup>/año) y con regulación (42,7 km<sup>3</sup>/año). Este último valor se reduce a 29,2 km<sup>3</sup>/año asignando unos caudales ecológicos iguales al 5 % y a 23,9 km<sup>3</sup>/año si se eleva al 15 %. En algunas demarcaciones como las del Júcar y Segura, las demandas atendidas con agua de origen superficial han estado por encima de estas cifras, lo que indica la dificultad de cumplir con los caudales ecológicos. Si bien es una situación que se da con frecuencia, hay que recordar que los datos de la Tabla 3 son para el año hidrológico 2018/2019.

Pese a que la conexión entre aguas superficiales y subterráneas es importante, suele segregarse dentro de los recursos naturales la parte que corresponde a la recarga de acuíferos (Tabla 4).

Destacar que las cuencas donde la recarga de acuíferos representa un mayor porcentaje (Júcar y Segura) son las que cuentan con más recursos sin regulación (23,9 % y 22,5 %, respectivamente, según el *LBA*). Pero, en España existe una considerable regulación que permite que los recursos naturales disponibles pasen del 8 % hasta el 40 %. El *LBA* indica que hay 1.024 embalses con una capacidad de 56 hm<sup>3</sup> y, por otra parte, que la recarga anual en las 467 unidades hidrogeológicas, que entonces se habían diferenciado, era de 29.908 hm<sup>3</sup>.

Para la explotación de las aguas subterráneas hay más de un millón de pozos, siendo una parte significativa de ellos no regularizados. La afección de las aguas subterráneas a las superficiales es evidente pues una parte importante de ellas provienen de las primeras (Gráfico 14).

• • • • • • • •  
28 SORDO *et al.* (2022).

**Tabla 3.**

Disponibilidad de agua en función de los caudales ecológicos especificados (2018/2019)

Demarcación	Disponibilidad		Disponibilidad regulada con caudal ecológico (km <sup>3</sup> /año)								Demanda atendida (km <sup>3</sup> /año)	
	Natural (km <sup>3</sup> /año)	Regulada (km <sup>3</sup> /año)	Percentil mensual (%)									
			5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0	25,0		
Norte y Galicia	3,3	5,3	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7	1,6	1,6	1,5	1,4	
Duero	1,1	5,8	4,3	3,9	3,8	3,6	3,5	3,3	3,2	3,1	2,8	
Tajo	0,6	5,9	4,5	4,0	3,7	3,6	3,4	3,3	3,3	3,1	2,0	
Guadiana	0,1	3,9	3,7	3,5	3,5	3,4	3,4	3,4	3,3	3,3	1,6	
Guadalquivir	0,2	3,3	2,9	2,8	2,8	2,6	2,5	2,5	2,4	2,4	2,5	
Sur	0,1	1,6	1,4	1,3	1,3	1,3	1,2	1,1	1,0	1,0	1,0	
Segura	0,1	0,7	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,5	
Júcar	0,5	2,0	1,1	1,0	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,7	1,4	
Ebro	2,6	13,1	8,0	7,5	6,9	6,5	6,2	5,9	5,6	5,1	7,5	
C. I. Cataluña	0,3	1,2	0,9	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,6	0,5	
Total	8,8	42,7	29,2	27,2	25,9	24,7	23,9	23,0	22,3	21,0	21,3	

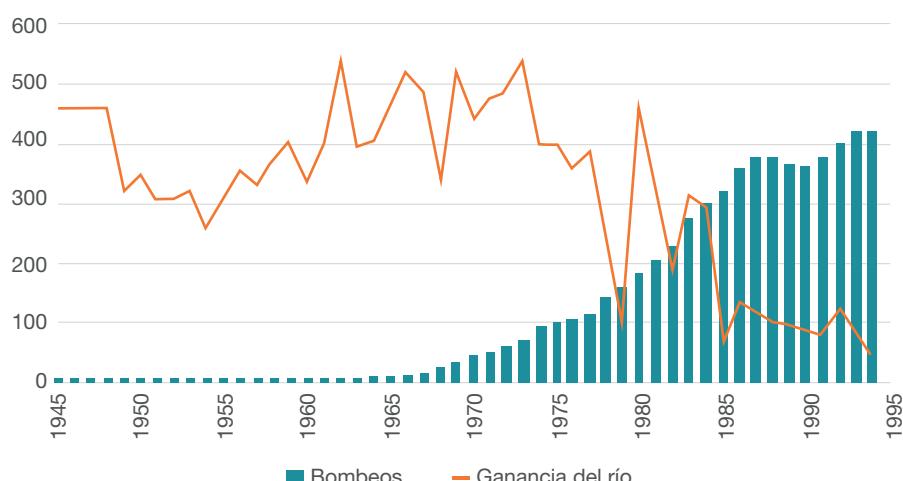
 Fuente: Sordo *et al.* (2022) e ISPHCYRH (2019).

**Tabla 4.**

Recursos naturales, recarga y capacidad de embalse

Ámbito	Aportación natural		Recarga de acuíferos		Capacidad de embalse	
	$R_N$ (hm <sup>3</sup> )	$R_{N-I}$ (hm <sup>3</sup> )	$R_{N-I}/R_N$ (%)	$V_E$ (hm <sup>3</sup> )		
Norte y Galicia	44.157	10.950	25	4.409		
Duero	13.660	3.000	22	7.667		
Tajo	10.883	2.393	22	11.135		
Guadiana	5.475	750	14	9.619		
Guadalquivir	8.601	2.343	27	8.867		
Sur	2.351	680	29	1.319		
Segura	803	588	73	1.223		
Júcar	3.432	2.492	73	3.349		
Ebro	17.967	4.614	26	7.702		
C. I. Cataluña	2.787	909	33	772		
España	<b>110.116</b>	<b>29.908</b>	<b>27</b>	<b>56.063</b>		

Fuente: LBA (1998).

**Gráfico 14.**Afección de los bombeos en La Mancha sobre los caudales del río Júcar. En m<sup>3</sup>/año

Fuente: LBA (1998).

Las explotaciones de los acuíferos costeros, donde las extracciones superan a la recarga, presentan graves problemas debido a la subida de la interfaz de agua dulce y salada y, consecuentemente, a su salinización. Según el LBA, de las 82 unidades hidrogeológicas costeras en la península y en las Islas Baleares, el 58 % presentan algún grado de intrusión marina.

Dentro de los recursos disponibles, el LBA diferencia entre superficiales, subterráneos, reuso, desalación y trasvases, totalizando un volumen anual de 45 km<sup>3</sup>, que representan un 40 % de los recursos naturales (Tabla 5). En los *Informes de Seguimiento* se distingue el origen del agua usada, los valores del año 2019/20 se recogen asimismo en la misma tabla<sup>29</sup>.

Desde que se elaboró el LBA se ha incrementado la extracción de agua en pozos (también de los no regularizados). Según el MAPA<sup>30</sup>, hoy, el agua subterránea representa el 26 % del total. Asimismo, la desalación ha sufrido un importante aumento, alrededor de 500 hm<sup>3</sup>, en 2019/2020, cifrándose la capacidad máxima de las instalaciones en 750 hm<sup>3</sup>. La superficie regada con agua desalada es de 20.550 ha, siendo los consumos actuales de la desalación, por el procedimiento de ósmosis inversa, del orden de 3 kWh/m<sup>3</sup> (por encima del límite técnico, 0,81 kWh/m<sup>3</sup>). Los precios medios<sup>31</sup> que se pagan en España están entre 0,6 y 1 euros/m<sup>3</sup>. La repentina subida del coste de la energía y su variabilidad incorpora incertidumbre a su probable crecimiento, aunque Lora *et al.* (2022) analizan posibles mejoras y realizan previsiones positivas (Tabla 6).

• • • • • • • • •

<sup>29</sup> ISPHCYRH (2020).

<sup>30</sup> [https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/gestion-sostenible-regadios/regadio-espanya/default\\_1.1.1.aspx](https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/gestion-sostenible-regadios/regadio-espanya/default_1.1.1.aspx)

<sup>31</sup> ZARZO (2022).

**Tabla 5.**

Recursos disponibles (R) frente a los naturales (R/RN), diferenciando entre superficiales, subterráneos, reuso, desalación y trasvases, y valores usados en el año 2019/20

	Recursos hídricos disponibles							Origen del agua usada en el año 2019/2020					
	R (hm <sup>3</sup> )	R/RN (%)	Superficie (hm <sup>3</sup> )	Subterránea (hm <sup>3</sup> )	Reuso (hm <sup>3</sup> )	Desalada (hm <sup>3</sup> )	Trasvase (hm <sup>3</sup> )	Superficie (hm <sup>3</sup> )	Subterránea (hm <sup>3</sup> )	Reuso (hm <sup>3</sup> )	Desalada (hm <sup>3</sup> )	Trasvase (hm <sup>3</sup> )	D Total (hm <sup>3</sup> )
Norte y Galicia	7.625	17	7.383	52		190		1.423	273	3	0	97	1.796
Duero	6.466	47	6.095	371				2.376	744	0	0	0	3.119
Tajo	5.708	52	5.845	164		-301		2.211	227	27	0	1	2.467
Guadiana	2.989	55	2.150	814	5	20		1.495	592	2	0	10	2.099
Guadalquivir	3.332	39	2.819	507	12	-6		2.370	956	18	0	6	3.350
Sur	825	35	359	420	19	20	7	1.028	619	32	44	196	1.918
Segura	1.355	169	626	478	56	195		556	524	97	229	232	1.638
Júcar	3.688	107	2.095	1.425	83	85		1.517	1.450	71	7	0	3.045
Ebro	10.973	61	11.012	198	6	-243		7.125	504	6	0	0	7.634
C. I. Cataluña	1.274	46	791	424	6	53		531	403	7	21	72	1.034
Baleares	316	48		284	26	6		9	168	24	17	0	218
Canarias	483	118		395	20	68		14	300	30	162	0	506
España	45.034	40	39.175	5.532	233	94	0	20.655	6.766	319	494	614	28.849

Fuente: *Libro Blanco del Agua* (1998) y ISPHCYRH (2020).

**Tabla 6.**

Predicción futura de los principales parámetros de la desalación

	2017	2022	2037
Energía eléctrica total (kWh/m <sup>3</sup> )	3,5-4,0	2,8-3,2	2,1-2,4
Coste del agua (euro/m <sup>3</sup> )	0,7-1,1	0,5-0,9	0,3-0,8
Coste inversión (euro/MLdía)	1,1-1,9	0,9-1,5	0,4-0,8
Productividad (m <sup>3</sup> /elemento de membrana 8")	28-47	35-55	95-120

Fuente: Lora *et al.* (2022).

En 2018, según el INE, el volumen de agua depurada fue de 4.400 hm<sup>3</sup> (se puede verter al río). A una porción aún pequeña (560 hm<sup>3</sup>) se le aplicó un tratamiento terciario para acondicionarla al uso regulado por RD 1620/2007, siendo el riego agrícola y de jardines su principal destino. Las diferencias entre comunidades son importantes, siendo la Comunidad Valenciana y la Región de Murcia, con un total de 305 hm<sup>3</sup> de agua regenerada, las que hacen más uso de ella. Los valores son algo mayores, aunque del mismo orden, que los del Informe de Seguimiento representado en la Tabla 6, donde se recoge que, para el año 2019/2020, el agua regenerada habría sido de 405 hm<sup>3</sup> y se habrían usado 320 hm<sup>3</sup>.



Entre los tratamientos terciarios para los usos agrícolas y medioambientales, que son los mayoritarios, predomina el físico-químico, seguido de una filtración con arena y una desinfección por radiación ultravioleta con dosificación de hipoclorito sódico. Según el MAPA<sup>32</sup>, con aguas depuradas se riegan 57.142 ha, pero en algunos casos tiene una salinidad elevada, lo que requiere de un manejo especial<sup>33</sup>.

Por último, los trasvases incrementan significativamente la disponibilidad en unas cuencas a costa de otras. En 2019/2020, los 614 hm<sup>3</sup> usados fueron de aguas procedentes de trasvases. Entre ellos destacan los del Tajo-Segura (una media de 287 hm<sup>3</sup>/año), Zahorra-Arratia (190) y Ebro-Campo (53), según el *LBA*.

De mayor importancia era el trasvase que se pretendía realizar en el PHN 2000 –desde el Ebro (1.050 hm<sup>3</sup>/año) al Júcar (315), al Segura (450), a Almería (95) y a las C. I. de Cataluña (190)–, pero que en 2004 fue derogado. Con él se querían satisfacer las demandas de los citados destinos que superaban a los recursos la mayor parte de los años (escasez coyuntural) y, en especial, al Segura, que estaba por encima (escasez estructural). Al considerar la variabilidad temporal y espacial de cada uno de los sistemas de explotación divididos en cada demarcación, la situación de déficit tiene una mayor representatividad espacial (Figura 18).

En cuanto a la demanda actual, el *LBA* la estima en 35 km<sup>3</sup> –para riego (24 km<sup>3</sup> ≈ 68 %), para abastecimiento de poblaciones (4,7 km<sup>3</sup> ≈ 13 %), para la industria (1,7 km<sup>3</sup> ≈ 5 %) y para refrigeración (4,9 km<sup>3</sup> ≈ 14 %)–. Se diferencia entre la demanda que consume el recurso (demanda consuntiva) y aquella que solo lo usa. En este sentido, estima que es consuntiva el 80 % de la destinada al riego (el otro 20 % retornaría a la red fluvial), el 20 % de la destinada a abastecimientos e industria (80 % sería retorno) y el 5% de la destinada a refrigeración.

En los *Informes de Seguimiento* en vez de demandas se usa el término ‘demandas consuntivas’, los valores para el Horizonte 2021 se recogen en la Tabla 7<sup>34</sup>.

El regadío ocupaba 3,4 millones de hectáreas, lo que implicaba una dotación media de 7.010 m<sup>3</sup>/ha<sup>35</sup>. Las diferencias en cuanto a dotación en los distintos ámbitos eran importantes. Así, se cifraban que 1,4 millones de hectáreas (40 %) estaban infradotadas y tenían problemas de déficit de agua. PNR (2001) califica a una superficie infradotada cuando el volumen suministrado no alcanza el 75 % de la demanda bruta estimada, cifrándose el déficit global en estas en 2,7 km<sup>3</sup>. En la actualidad, el regadío ocupa unas 3,9 millones de hectáreas (Gráfico 15), por lo que el uso medio del agua por unidad de superficie estaría alrededor de 6.600 m<sup>3</sup>/ha, según los datos de los volúmenes destinados al uso agrario del *Informe de Seguimiento* de 2020 y la superficie de regadío del SCYRSE (2020).

• • • • • • •

<sup>32</sup> [https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/gestion-sostenible-regadios/regadio-espanya/default\\_1.1.1.aspx](https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/gestion-sostenible-regadios/regadio-espanya/default_1.1.1.aspx)

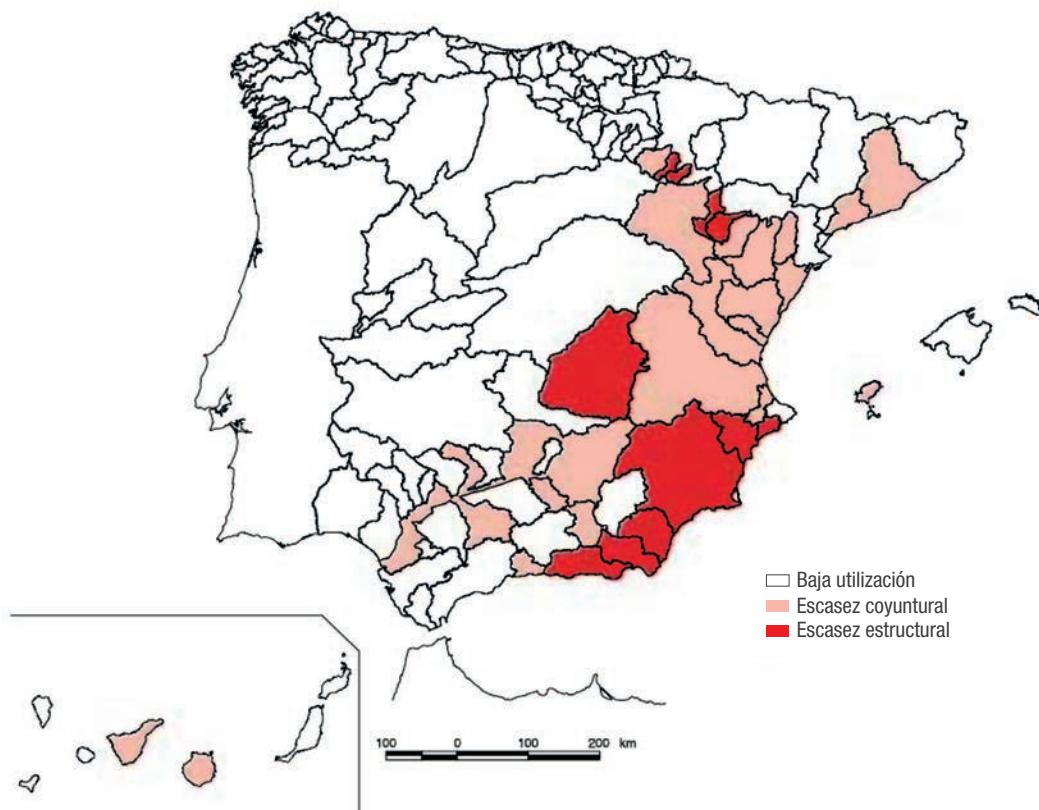
<sup>33</sup> TANJI *et al.* ()

<sup>34</sup> ISPHCYRH (2020).

<sup>35</sup> LBA (1998).

**Figura 18.**

Mapa de riesgo de escasez en los sistemas de explotación de los planes hidrológicos


 Fuente: *LBA*.

**Tabla 7.**

Demandas de agua en España

	Recursos hídricos disponibles (hm <sup>3</sup> )					Origen del agua usada en el año 2019/2020 (hm <sup>3</sup> )				
	Abastecimiento	Uso agrario	Uso Industrial	Refrigeración	Total demanda	Abastecimiento	Uso agrario	Uso Industrial	Otros usos consumtivos	Total usos consumtivos
Norte y Galicia	7.625	17	7.383	52		1.423	273	3	0	97
Duero	6.466	47	6.095	371		2.376	744	0	0	0
Tajo	5.708	52	5.845	164		2.211	227	27	0	1
Guadiana	2.989	55	2.150	814	5	1.495	592	2	0	10
Guadalquivir	3.332	39	2.819	507	12	2.370	956	18	0	6
Sur	825	35	359	420	19	1.028	619	32	44	196
Segura	1.355	169	626	478	56	556	524	97	229	232
Júcar	3.688	107	2.095	1.425	83	1.517	1.450	71	7	0
Ebro	10.973	61	11.012	198	6	7.125	504	6	0	0
C. I. Cataluña	1.274	46	791	424	6	531	403	7	21	72
Baleares	316	48		284	26	9	168	24	17	0
Canarias	483	118		395	20	14	300	30	162	0
España	45.034	40	39.175	5.532	233	20.655	6.766	319	494	614

 Fuente: *Libro Blanco del Agua* (1998) y ISPHCYRH (2020).



Los volúmenes y dotaciones anteriores resultan mayores que los obtenidos con las encuestas del INE para los volúmenes y de ESYRCE para las superficies. Según estas, se irían reduciendo progresivamente el volumen de agua en el sector agrario y su dotación por unidad de superficie (Gráfico 16). La dotación en 2018 habría sido de 4.100 m<sup>3</sup>/ha (5.625, 4.700 y 3.150 m<sup>3</sup>/ha, para los métodos de superficie, aspersión y goteo, respectivamente), lejos de los 6.600 m<sup>3</sup>/ha de los datos del *Informe de Seguimiento*. Las diferencias se deben a que los últimos hablan de volúmenes enviados y los primeros de volúmenes distribuidos en parcela, que son menores por haber pérdidas en el transporte y distribución. Las variaciones entre zonas (Tabla 7) y cultivos son importantes. En la actualidad, es frecuente regar con menor dotación que la de las necesidades teóricas en muchos cultivos.

Con los datos del INE se han obtenido los volúmenes relativos del año 2000 (Gráfico 17) y se observa que La Rioja, Región de Murcia y Extremadura lo han incrementado. Por el lado contrario, la que más los ha reducido es Cataluña y, en menor medida, la Comunidad Valenciana y Aragón, que están un poco por debajo de la media española. Castilla y León los habría disminuido igual que el conjunto de España.

También, con datos del INE y del ESYRCE se han obtenido las dotaciones medias en distintas comunidades en 2018 (Gráfico 18). En las diferencias influyen varios aspectos como predominancia de cultivos y métodos de riego, entre otros.

La DGA y el CEH en 2018, en un documento de síntesis, analizan el índice de explotación de las distintas demarcaciones hidrográficas (Tabla 8).

En lo que se refiere al problema de las sequías, el *LBA* indica que las sequías de los períodos 1941-1944, 1979-1982 y 1990-1994 fueron muy generalizadas, afectando a la mayor parte del territorio español. En las cuencas del Guadiana, del Guadalquivir y del Sur se redujo la precipitación media en torno al 30 %. La disminución de las aportaciones fue más importante, llegando al 74 % en el Guadiana, al 72 % en el Guadalquivir, al 59 % en la cuenca Sur y al 50 % en el Tajo. Con carácter general, en situaciones de emergencia, las aguas subterráneas pueden contribuir a paliar el déficit, bombeando por encima de la explotación habitual.

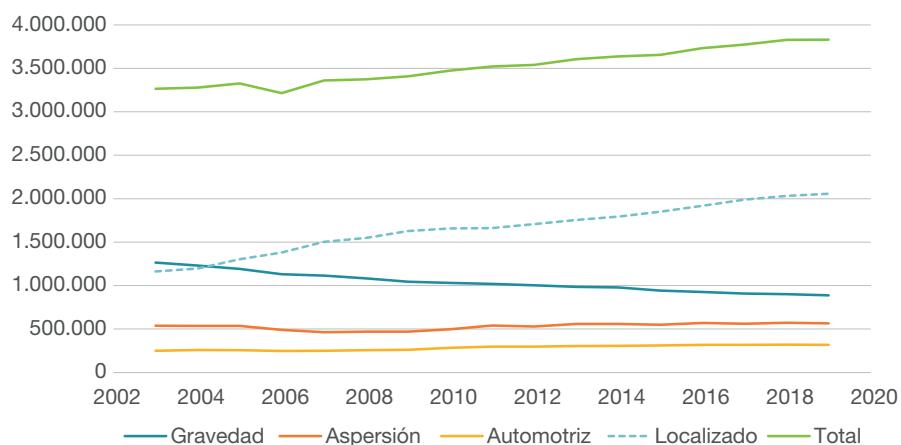
En cuanto a la calidad del recurso, la DMA obliga a establecer programas de seguimiento y control de las masas de aguas superficiales y subterráneas, e identificar las que están en riesgo de no cumplir los objetivos medioambientales para, en su caso, adoptar medidas para su recuperación. En España se han declarado 25 masas de agua subterránea en riesgo de no alcanzar el buen estado, 13 por riesgo cuantitativo y 12 por riesgo cuantitativo y químico (Figura 16).

En el seguimiento de las masas de aguas superficiales se analiza su alteración, con respecto al régimen natural, y su estado químico y ecológico. En los puntos de control se han establecido caudales mínimos y se realizan los oportunos análisis. Los resultados de los caudales mínimos reflejan un incumplimiento significativo en muchos de ellos (Figura 17), aunque la situación de 2020 ha mejorado sensiblemente, frente a la de 2019 (Tabla 9). El control del buen estado de las aguas muestra que hay un porcentaje significativo que no lo están (Tabla 10).

WWF España, que forma parte de la organización internacional independiente, dedicada a la defensa de la naturaleza y el medioambiente, ha clasificado el riesgo de sobreexplotación de los cauces superficiales españoles (Figura 18).

**Gráfico 15.**

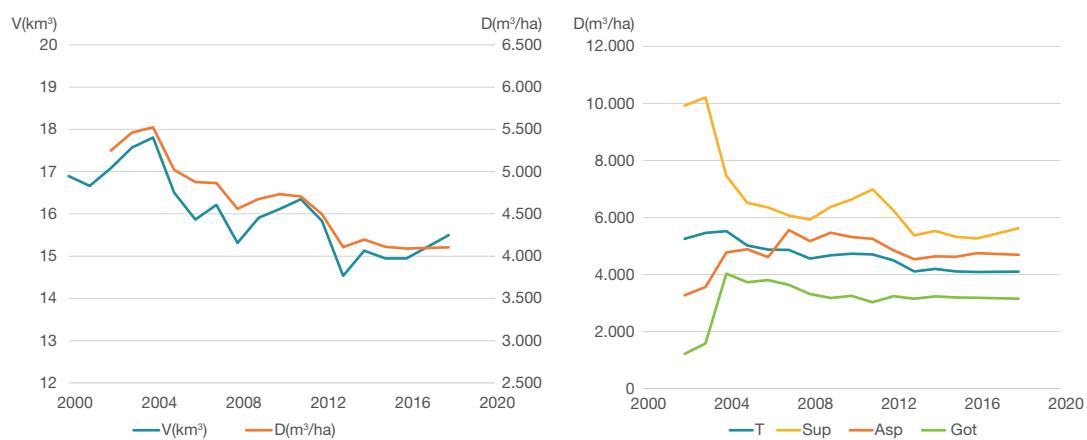
Evolución de la superficie de riego total y según los distintos sistemas de riego. En hectáreas



Fuente: Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos (ESYRCE).

**Gráfico 16.**

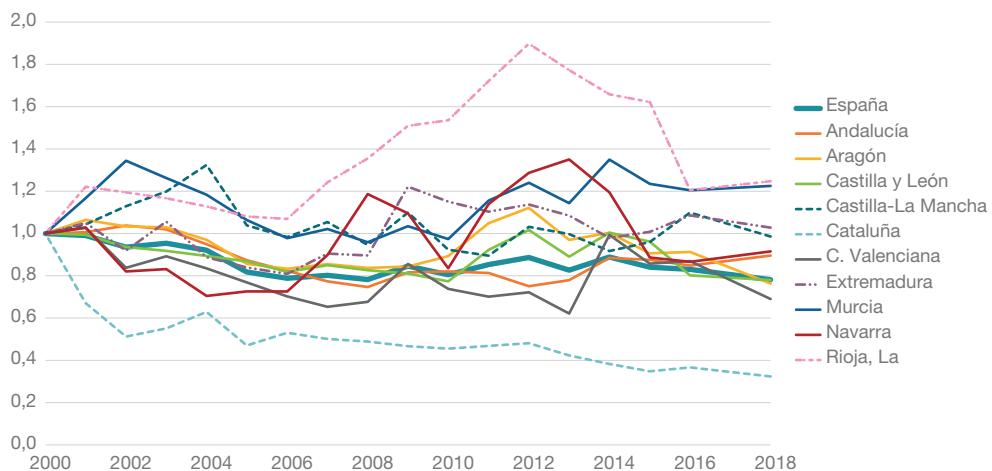
Evolución del volumen de riego usado en el sector agrario español y dotación media por unidad de superficie y método de riego



Fuente: INE\_EUASA y ESYRCE.

**Gráfico 17.**

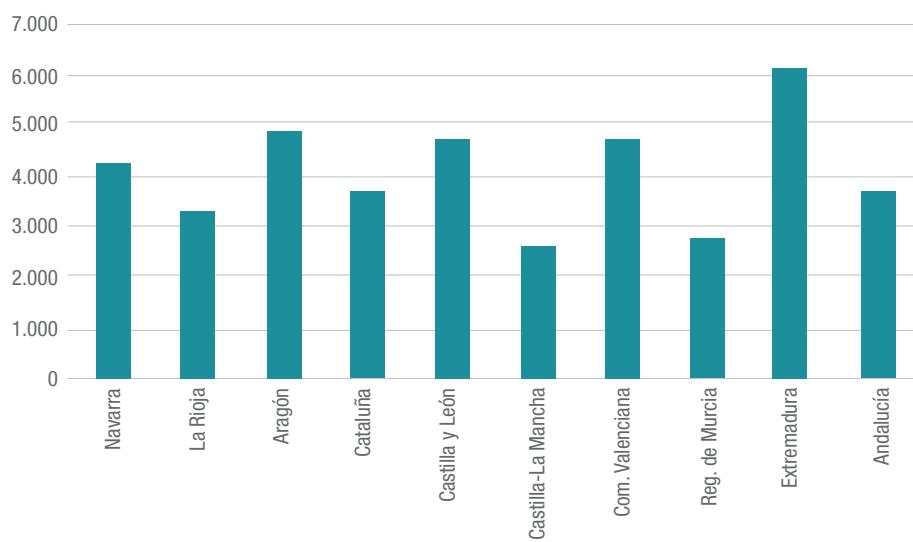
Evolución del volumen de riego usado en el sector agrario español en relación al del año 2000



Fuente: INE. Elaboración propia.

**Gráfico 18.**

Dotaciones medias en algunas comunidades autónomas (2018)



Fuente: INE y SCYRSE.



**Tabla 8.**

Recurso, asignación, consumo e índices de explotación de algunas demarcaciones hidrográficas (2018)

DDHH	Recurso (R) (hm <sup>3</sup> )	Asignación (A) (hm <sup>3</sup> )	Consumo (c) (hm <sup>3</sup> )	A/R (c) (%)	C/R (%)
Duero	12.777	3.755,9	2.322,0	29,4	18,2
Tajo	7.865	3.001,8	1.707,0	38,2	21,7
Guadiana	4.869	2.358,6	1.741,3	48,4	35,8
Tinto-Odiel-Piedras	801	467,9	133,3	58,4	16,6
Segura	1.425 <sup>a</sup>	1.600,0	1.109,5	112,3	77,9
Júcar	3.194	2.789,2	1.627,6	87,3	51,0
Ebro	1.434	8.378,0	5.726,6	58,4	39,9
C. I. Cataluña	2.536	1.007,8	848,3	39,7	33,5
Baleares	212	150,2	206,2	70,9	97,3
Canarias <sup>b</sup>	1.083	490,3	223,2	45,3	20,6
<b>Total</b>	<b>99.590</b>	<b>30.795,0</b>	<b>20.437</b>	<b>30,9</b>	<b>20,5</b>

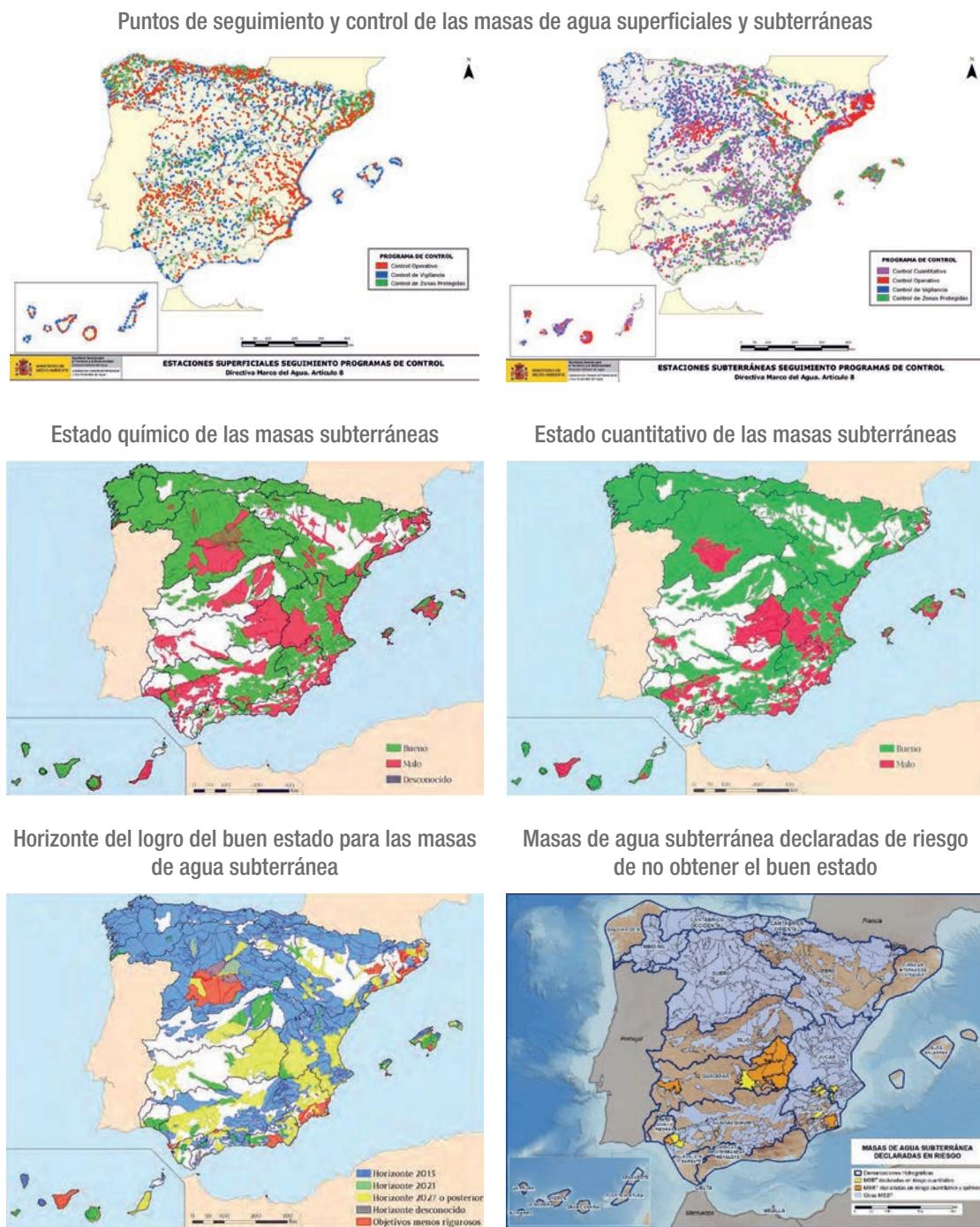
<sup>a</sup> Se contabilizan recursos de la demarcación que no drenan al río Segura.

<sup>b</sup> CAN: datos agregados de las siete demarcaciones canarias. Información provisional del segundo ciclo pendiente de la aprobación definitiva del plan de demarcación.

Fuente: DGA-CEH (2018).

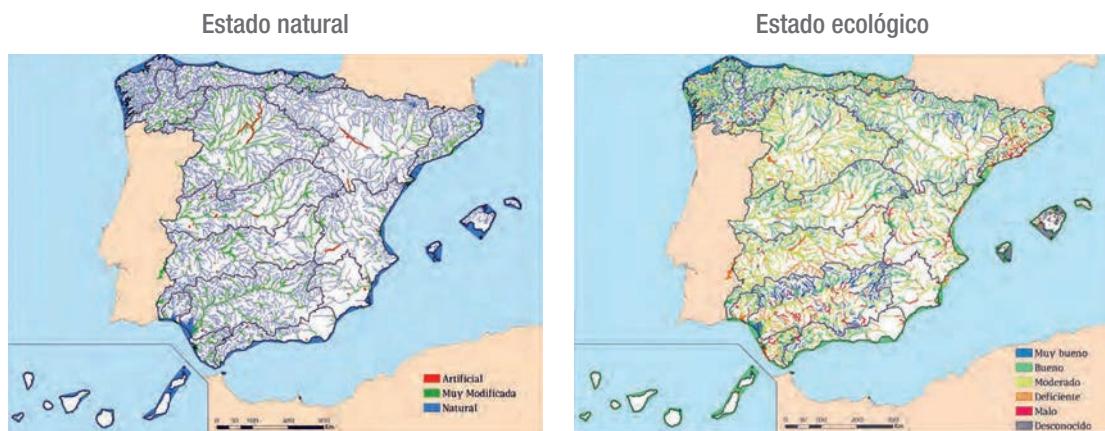


**Figura 16.**  
Estado de las masas de agua subterránea



Fuente: Ministerio de Medio Ambiente.

**Figura 17.**  
 Estado de las masas de agua superficial



**Tabla 9.**  
 Masas de agua con régimen de caudales mínimos establecido en algunas demarcaciones hidrográficas peninsulares. Análisis del cumplimiento

DDHH	Núm. total masas río (ee)	Plan Hidrológico 2.º ciclo				Seguimiento del Plan (2020)			
		Masas río con $Q_{min}$ establecido		En sequía prolongada <sup>a</sup>	Núm.	Masas río con $Q_{min}$ controlado		Núm.	% <sup>c</sup>
		Núm.	%			Núm.	%		
Duero	645	645	100,0	645 <sup>a</sup>	30	4,7	8	26,7	
Tajo	249	19	7,6	1	17	89,5	0	0,0	
Guadiana	199	199	100,0	7	9	4,5	8	88,9	
Guadalquivir	339	339	100,0	267	61	18,0	0	0,0	
Segura	77	61 <sup>c</sup>	100,0 <sup>c</sup>	9	25	41,0	10	40,0	
Júcar	273	184	67,4	10	55	29,9	20	36,4	
Ebro	638	69	10,8	5	52	75,4	3	5,8	
C. I. Cataluña	248	248	100,0	0	70	28,2	2	2,9	
<b>Total 2020</b>	<b>3.871</b>	<b>2.964</b>	<b>76,9<sup>c</sup></b>	<sup>a</sup>	<b>428<sup>b</sup></b>	<b>18,2<sup>b, d</sup></b>	<b>98</b>	<b>22,9<sup>d</sup></b>	
<b>Total 2019</b>	<b>3.871</b>	<b>2.964</b>	<b>76,9<sup>c</sup></b>	<sup>a</sup>	<b>418<sup>b</sup></b>	<b>17,8<sup>b, d</sup></b>	<b>132</b>	<b>31,6<sup>d</sup></b>	

<sup>a</sup> Se considera el número de masas en las que específicamente existe un caudal ecológico mínimo establecido para situaciones de sequía prolongada. En algunos PH se define un porcentaje de reducción en condiciones de sequía prolongada para todas las masas de agua, sin especificar el número de ellas en que realmente se puede aplicar (que excluiría las zonas de Red Natura 2000 o de humedales Ramsar). Para evitar la distorsión introducida por este dato no se calcula el total.

<sup>b</sup> El cumplimiento de caudales ecológicos mínimos en el Guadalquivir se ha realizado con el seguimiento en 61 puntos de control aguas abajo de las principales infraestructuras, y en puntos de aforo en ríos. Estos puntos pueden controlar más de una masa de agua, lo que ha de tenerse en cuenta en la valoración de estas cifras.

<sup>c</sup> En la DH del Segura se considera necesario el establecimiento del caudal mínimo en las 61 masas de carácter permanente, y sobre ese valor se calcula el porcentaje de masas con caudal mínimo establecido tanto en el Segura como en el total.

<sup>d</sup> Los porcentajes de masas con caudales controlados e incumplimientos se han calculado considerando las demarcaciones en las que existen datos.

Fuente: ISPHCYRH (2020).

**Tabla 10.**

Evaluación y objetivos del estado de las masas de agua superficial en los planes de segundo ciclo, y estimación de su evolución en los años 2016 a 2020

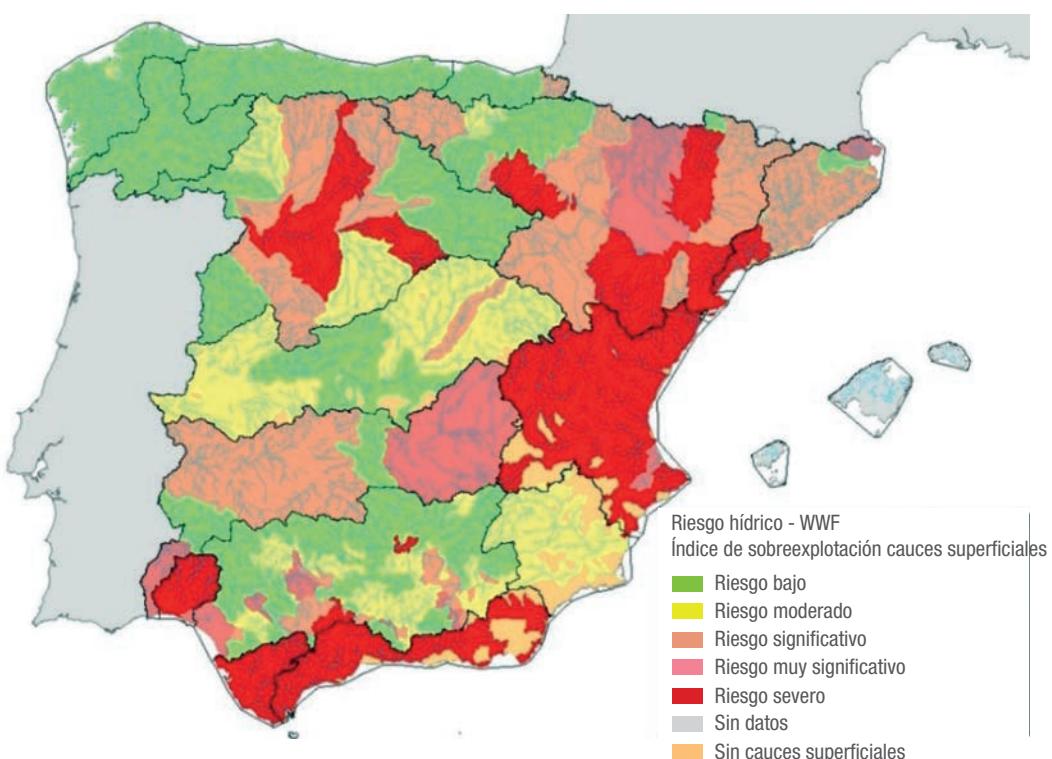
DDHH	Plan Hidrológico 2.º ciclo						Seguimiento del Plan						
	MASp	MASp con OMR		MASp en buen estado		Objetivo 2021	MASp en buen estado						
		Núm.	Núm.	%	Núm.	%	Núm.	Núm.	Núm.	Núm.	Núm.	%	
Duero	709	66	9,3	204	28,8	349	49,2	253	416	417	407	398	56,1
Tajo	323	18	5,6	182	56,3	265	82,0	116	117	138	140	140 <sup>a</sup>	43,3
Guadiana	316	0	0,0	93	29,4	201	63,6	109	130	118	91	61	19,3
Guadalquivir	446	23	5,2	273	61,2	363	81,4	276	271	281	281	282	63,2
Segura	114	0	0,0	60	52,6	94	82,5	57	58	53	51	58	50,9
Júcar	349	0	0,0	122	35,0	150	43,0	114	144	150	136	145	41,5
Ebro	823	12	1,5	576	70,0	607	73,8	607	586	588	569	569 <sup>a</sup>	69,1
C. I. Cataluña	346	51	14,7	95	27,5	160	46,2	SD	72 <sup>a</sup>	136	137	134	38,7
<b>Total</b>	<b>5.162</b>	<b>173</b>	<b>3,4</b>	<b>2.775</b>	<b>53,8</b>	<b>3.747</b>	<b>72,6</b>	-	<b>3.006</b>	<b>3.102</b>	<b>3.003</b>	<b>2.989</b>	<b>57,9</b>

<sup>a</sup> Cuando no se ha dispuesto de datos actualizados, se han considerado los del último año en el que existía una estimación global.

Fuente: ISPHCYRH (2020).

**Figura 18.**

Índice de sobreexplotación de los cauces superficiales



Fuente: WWF España.



## 4.2. Eficiencia. Uso de energía. Productividad

Para valorar la eficiencia del uso del agua para riego, el PNR (2001) recoge una relación entre la demanda neta y la bruta (Tabla 11). En la diferenciación por métodos de riego se recogen los resultados de un estudio realizado en España (Tabla 12) y en California (Tabla 13). Los altos CV del primer estudio o la desviación típica  $\sigma$ , y los del segundo, deberían servir para eliminar la automática relación que algunos parecen hacer entre sistema y rendimiento. Así, aunque resulte obvio, quizás convenga recordar que en el riego por goteo si la obturación de goteros es importante o, simplemente, si se riega con más cantidad que la necesaria (situaciones, ambas, más frecuentes de lo deseable), el rendimiento puede ser tan bajo como con el riego tradicional. La elección del método de riego debe hacerse valorando muchos aspectos, no con el prejuicio de ahorrar agua, pues aunque el método ayuda, el ahorro se consigue reduciendo los volúmenes aplicados.

En la actualidad, los planes hidrológicos de cuenca establecen dotaciones máximas en función de la escasez y del origen del agua en el sistema de explotación (Tabla 14). También es frecuente diferenciar entre cultivos (Tabla 15). Con ello se pretende usar adecuadamente los recursos hídricos, sin despilfarro. Para ello se estiman en cada unidad diferenciada las necesidades netas según las variables climáticas y cultivo, que se transforman en brutas, considerando eficiencias de aplicación, así como de transporte y distribución. Los valores resultantes sirven de referencia en ausencia de estudios específicos más precisos.

Las eficiencias de aplicación en parcela asignadas deben entenderse como resultados potenciales que pueden conseguirse y, por tanto, fijarse como objetivos. En la Tabla 16 se recogen las eficiencias consideradas en el Plan Hidrológico del Tajo. Otros planes como el del Guadalquivir en 2015, para obtener los valores preliminares de eficiencia de transporte y de distribución, tiene en cuenta también el estado de las instalaciones, distinguiendo tres casos: mal, normal y bueno. Los valores que proponen las distintas demarcaciones son similares.

En España, los cultivos con mayor representación espacial son los cereales y el olivar, ambos con una superficie próxima al millón de hectáreas (Gráfico 19).

Los cereales se riegan a partes iguales por superficie y por aspersión, mientras que por goteo se abastece el 95 % del olivo, seguido de la vid (97 %) y los frutales no cítricos (85 %). También, en orden decreciente, los cítricos (85 % por goteo), los forrajeros (superficie y aspersión a partes iguales), las hortalizas y flores (50 % por goteo, 30 % por superficie y 20 % por aspersión) y los industriales (25 % por superficie, 50 % por aspersión y 25 % por goteo). Destacan, asimismo, las 35.000 ha de cultivos de invernaderos, todos regados por goteo, si bien en la misma encuesta de ESYRCE (2021), en el epígrafe «Tipos de regadío. Distribución de tierras de cultivo en regadío o invernadero por provincias» se indica que en España hay 73.115 ha de invernadero, destacando las 56.000 ha de Andalucía (33.300 en Almería y 14.400 en Huelva), 6.500 ha en la Región de Murcia, 5.800 ha en Canarias, 1.200 ha en la Comunidad Valenciana y 920 en Cataluña.



**Tabla 11.**  
Demanda del regadío

Ámbito	Demanda neta	Demanda bruta	Dn/Db	Superficie	Demanda bruta
	m <sup>3</sup> /ha	m <sup>3</sup> /ha		ha	hm <sup>3</sup>
Galicia Costa	1.670	2.946	0,57	26.371	78
Norte	2.401	4.618	0,52	74.032	342
Duero	4.135	7.354	0,56	447.576	3.292
Tajo	4.905	9.131	0,54	201.336	1.838
Guadiana	4.046	6.512	0,62	335.590	2.185
Guadalquivir	4.392	7.160	0,61	602.966	4.317
Sur	4.623	7.397	0,62	142.457	1.054
Segura	3.855	5.876	0,66	276.316	1.624
Júcar	3.743	6.373	0,59	384.802	2.452
Ebro	4.192	7.793	0,54	738.662	5.756
C. I. Cataluña	2.835	4.352	0,65	67.774	295
Baleares	3.599	4.804	0,75	17.376	83
Canarias	6.261	8.030	0,78	29.379	236
<b>Total</b>	<b>4.116</b>	<b>7.042</b>	<b>0,58</b>	<b>3.344.637</b>	<b>23.552</b>

Fuente: PNR (2001).

**Tabla 12.**  
Relación entre el volumen necesario para evapotranspiración y enviado

Método	$R = V_{Et}/V_{su}$	CV
Superficie	0,54	0,42
Presión	0,80	0,27

\* Estudio realizado en 38 zonas regables españolas (0,64 Mha).

Fuente: Krinner *et al.* (1994).

**Tabla 13.**  
Resultados de evaluaciones de la eficiencia del riego en California

Método	Evaluaciones	Ra	σ
Superficie	164	0,69	0,13
Máquinas de riego	57	0,81	0,11
Aspersión bajo copa de árboles	28	0,81	0,18
Goteo	458	0,76	0,18
Surcos	157	0,66	0,14
Tablares	72	0,80	0,14

Fuente: Hanson *et al.* (1995).



**Tabla 14.**  
Dotaciones brutas máximas

Dotaciones brutas máximas en regadíos de iniciativa privada. En m<sup>3</sup>/ha/año

Sistema de explotación	Con agua superficial	Con agua subterránea
Cabecera	6.000	5.200
Tajuña	6.000	5.500
Henares	6.200	5.500
Jarama Guadarrama	6.500	5.500
Alberche	6.400	5.600
Tajo Izquierda	6.500	5.600
Tíetar	6.800	6.000
Árrago	6.900	6.900
Alagón	5.900	5.900
Bajo Tajo	7.000	6.900

Dotaciones máximas en cabecera de canal para zonas regables de iniciativa pública. En m<sup>3</sup>/ha/año

Zona regable	Dotación bruta máxima
Estremera	6.500
Aranjuez	*
Henares	7.100
Bornova	6.600
Real acequia del Jarana	9.700
Castrejón margen derecha	7.000
Castrejón margen izquierda	8.000
Alberche	7.500
Rosarito	7.100
Alagón	9.400
Ambroz	7.000
Árrago	9.000
Azután	7.000
Valdecañas	6.000
Peraleda de la Mata	7.000
Alcolea	7.000
Salor	7.700
Casas de don Antonio	7.000
La Sagra Torrijos	7.860
Almoguera (Illana – Leganiel)	6.500
Tajuña	6.000

\* Valor pendiente del estudio agronómico del p. de modernización.

Fuente: PH de Tajo (2016).

**Tabla 15.**

Dotaciones netas por cultivo en los planes hidrológicos

Dotaciones netas máximas en regadíos de iniciativa privada.  
En m<sup>3</sup>/ha

Tipo de cultivo	Cabecera Tajuña Henares Alberche	Jarama Guadarrama Tajo Izda. Tiétar	Alagón Árrago Bajo Tajo
Arroz			14.000
Cereal invierno	2.700	3.000	3.300
Girasol	3.600	4.000	4.400
Maíz	5.000	5.500	6.100
Patata	3.600	4.000	4.400
Tabaco		4.600	5.100
Alfalfa	6.800	7.600	8.400
Hortícolas	3.500	3.700	4.000
Cítricos			5.000
Frutales	5.400	6.000	6.800
Vid y olivo	2.250	2.500	2.700

Dotaciones netas por cultivo. En m<sup>3</sup>/ha/año

Cultivo	Dotación neta
Fresa, fresón y otras berries	4.500
Cereal invierno	1.900
Maíz	5.000
Arroz	10.450
Girasol	2.600
Otros cultivos herbáceos	4.500
Cultivos hortícolas	4.500
Frutales	5.400
Cítricos	5.400
Almendro	2.500
Olivar*	1.290
Otros cultivos leñosos	4.000
Alfalfa	4.500
Chopo	5.400

\* Se admitirán dotaciones hasta un máximo de 2.150 m<sup>3</sup>/ha, en explotaciones cuyos derechos concesionales otorgados lo permitan

**Tabla 16.**

Eficiencias consideradas objetivo en el Plan Hidrológico del Tajo de 2016

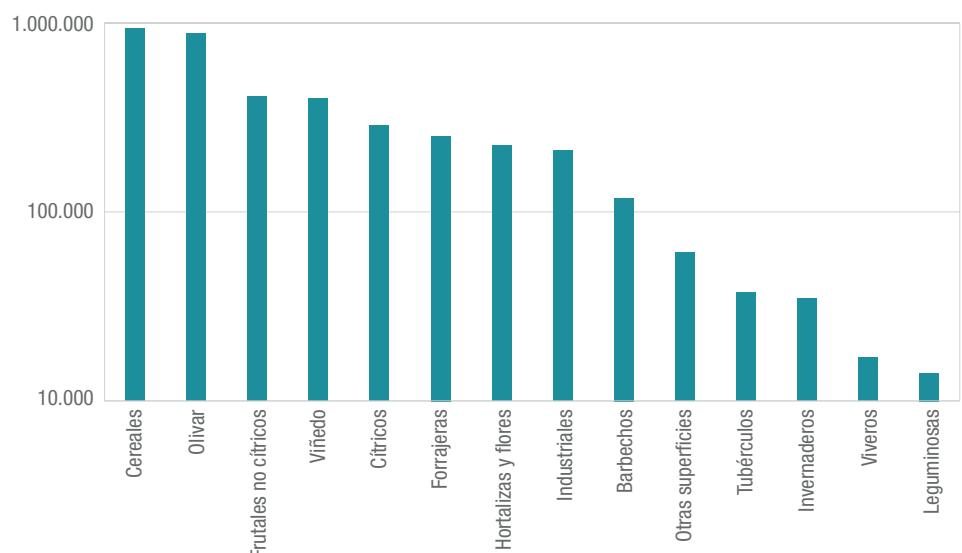
Tipo de regadío	E <sub>c</sub>	E <sub>d</sub>	E <sub>A</sub>			E <sub>G</sub>		
			G	A	L	G	A	L
Zona regable de iniciativa pública	0,87	0,80	0,70	0,85	0,95	0,49	0,59	0,66
Regadío iniciativa privada, aguas superficial	0,90	0,95	0,70	0,85	0,95	0,60	0,73	0,81
Regadío iniciativa privada, agua subterránea	1,00	0,95	0,70	0,85	0,95	0,67	0,81	0,90

EC = eficiencia en conducción principal; ED = eficiencia en red de distribución; EA = eficiencia de aplicación en parcela; EG = eficiencia global, EG = EA-EC-ED; G = riego por gravedad; A = riego por aspersión; L = riego localizado.

Fuente: PH de Tajo (2016).

**Gráfico 19.**

Representación espacial de los cultivos en el regadío. En hectáreas



Fuente: ESYRCE (2021).

En lo que se refiere a la evolución del uso de agua y al consumo de energía para riego<sup>36</sup> se ha obtenido la relación agua-consumida/agua-usada, uso por hectárea y consumo de energía por m<sup>3</sup> (Tabla 17). Según estos datos, el volumen unitario usado tendría una tendencia decreciente, situándose en 6.500 m<sup>3</sup>/ha en 2007. La relación entre agua usada y consumida se habría incrementado considerablemente en ese periodo, pasando de 0,60 hasta 0,83 y, en consecuencia, los retornos unitarios del regadío cabe esperar que se hayan reducido en las cantidades correspondientes. No obstante, destacable es el dato de que la energía usada en cada m<sup>3</sup> habría aumentado de 0 hasta 88 m de altura o si se prefiere hasta 0,240 kWh/m<sup>3</sup>.

Resultados más actuales como los recogidos en la tesis doctoral de Espinosa-Tasón (2022) reducen algo los valores del uso del agua por unidad de superficie y el consumo de energía por cada m<sup>3</sup> (Gráfico 20). Ciertos matices no investigados, seguramente similares a los apuntados en las dotaciones brutas o netas, cabe pensar que sean la razón de la divergencia en los datos de energía. La tendencia creciente en la curva de energía parece que se mantiene hasta el momento actual, la tendencia decreciente de las dotaciones seguramente se ha amortiguado más.

• • • • • • • • •

<sup>36</sup> COROMINAS (2009).

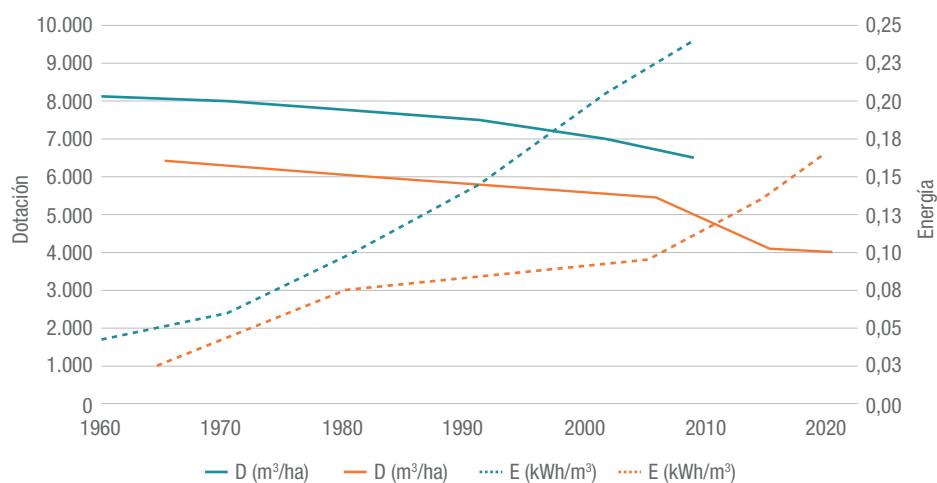


**Tabla 17.**  
Evolución del uso y consumo de agua y energía por el regadío

Año	Superficie Mha	Uso de agua		Consumo de agua		Consumo de energía		
		hm <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /ha	hm <sup>3</sup>	C/uso	GW.h	m/m <sup>3</sup>	kWh/m <sup>3</sup>
1900	1,00	9.000	9.000	5.400	0,60	-	0,0	0,000
1930	1,35	12.150	9.000	7.594	0,63	182	5,5	0,015
1940	1,50	12.750	8.500	8.288	0,65	191	5,5	0,015
1950	1,50	12.375	8.250	8.353	0,67	309	9,2	0,025
1970	2,20	17.600	8.000	12.320	0,70	1.056	22,0	0,060
1980	2,70	20.925	7.750	14.648	0,70	2.093	36,7	0,100
1990	3,20	24.000	7.500	17.400	0,73	3.480	53,2	0,145
2000	3,41	23.870	7.000	18.499	0,77	4.893	75,2	0,205
2007	3,76	24.440	6.500	20.163	0,83	5.866	88,1	0,240

Fuente: Corominas (2009) y elaboración propia.

**Gráfico 20.**  
Evolución de la dotación y de la energía en el regadío español



\* Las líneas verdes corresponden a Corominas (2009) y las naranjas a Espinosa-Tasón (2022).

Fuente: Corominas (2009) y Espinosa-Tasón (2022).

En lo que se refiere a diferencias por métodos de riego en 2008, según Corominas (2009), el uso de agua era de 7.500, 6.500 y 5.000 m<sup>3</sup>/ha para el riego por superficie, aspersión y localizado, respectivamente. Estos valores, a partir de datos de volúmenes aplicados y superficies de riego, con los distintos métodos de Encuesta ESYRCE, habrían sido 5.360, 4.600 y 3.071 m<sup>3</sup>/ha en 2016 y 5.661, 4.610 y 3.083 m<sup>3</sup>/ha en 2018. Lo que indica que la tendencia decreciente de la dotación ha podido finalizar, coincidente con lo indicado en la Figura 8, con datos del INE y ESYRCE, en los que desde 2013 las dotaciones serían similares.



Las estadísticas de uso de energía según método de riego pueden ser engañosas por ser consecuencia de factores que no dependen del método, si bien, en general, el paso de riego por superficie a goteo puede significar un incremento de 0,06 a 0,10 kWh/m<sup>3</sup> y por aspersión de 0,11 a 0,16 kWh/m<sup>3</sup>. En el caso de aguas subterráneas, la energía necesaria para su elevación depende de la profundidad a la que se encuentre. No obstante, pueden ser orientativos los datos aportados por Corominas (2009), pues representan la situación media española (Tabla 18).

**Tabla 18.**

Energía gastada en relación con el método de riego y la fuente de suministro

	Superficie	Aspersión	Localizado
<b>Uso medio de agua (m<sup>3</sup>/ha)</b>	7.500	6.500	5.000
<b>Consumo energético unitario (kWh/m<sup>3</sup>)</b>			
Agua subterránea	0,15	0,49	0,68
Agua superficial	0,02	0,29	0,28
Trasvase	1,20	1,44	1,38
Desalación	3,70	3,94	3,88
Reutilización	0,25	0,49	0,43

Fuente: Corominas (2009) y elaboración propia.

En cuanto a la productividad del agua, también hay mucha información dispersa, con frecuencia referida a zonas concretas, si bien pueden ser ilustrativa. El PNR (2001) recogía los valores medios de los ingresos brutos (pta/m<sup>3</sup>) de los regadíos españoles por comarcas (Figura 19).

Según Berbel y Espinosa-Tasón (2020), a partir de los datos del *Anuario de Estadística Agraria*, la productividad media del agua creció de 0,70 a 0,95 euro/m<sup>3</sup> desde 1992 a 1999 y tuvo un descenso oscilante desde 1999 a 2009, hasta volver a 0,70 euro/m<sup>3</sup>. Desde entonces hasta ahora ha tenido una fase de crecimiento, que llegaría hasta casi el 1,0 euro/m<sup>3</sup> (Gráfico 21).

En los planes hidrológicos se recogen estimaciones del valor del agua en el regadío e incluso se hacen proyecciones futuras (Tabla 19).

Pulido-Velazquez *et al.* (2020) estudian la productividad económica unitaria del agua en las distintas comunidades. Para ello incluye la facturación agrícola vegetal, la superficie de regadío y el agua consumida (Gráfico 22).

Relacionado con los márgenes que produce el agua en las explotaciones, están los costes que suponen el suministro de la misma y la recuperación de costes que exige la DMA. En el documento DGA y CEH (2018) se recogen los costes del uso del agua en distintas demarcaciones y se ha añadido el volumen usado para el sector agrario, obteniéndose para este sector el coste por unidad de volumen (Tabla 20). También, en el mismo documento se muestra el índice de recuperación de costes (Tabla 21).

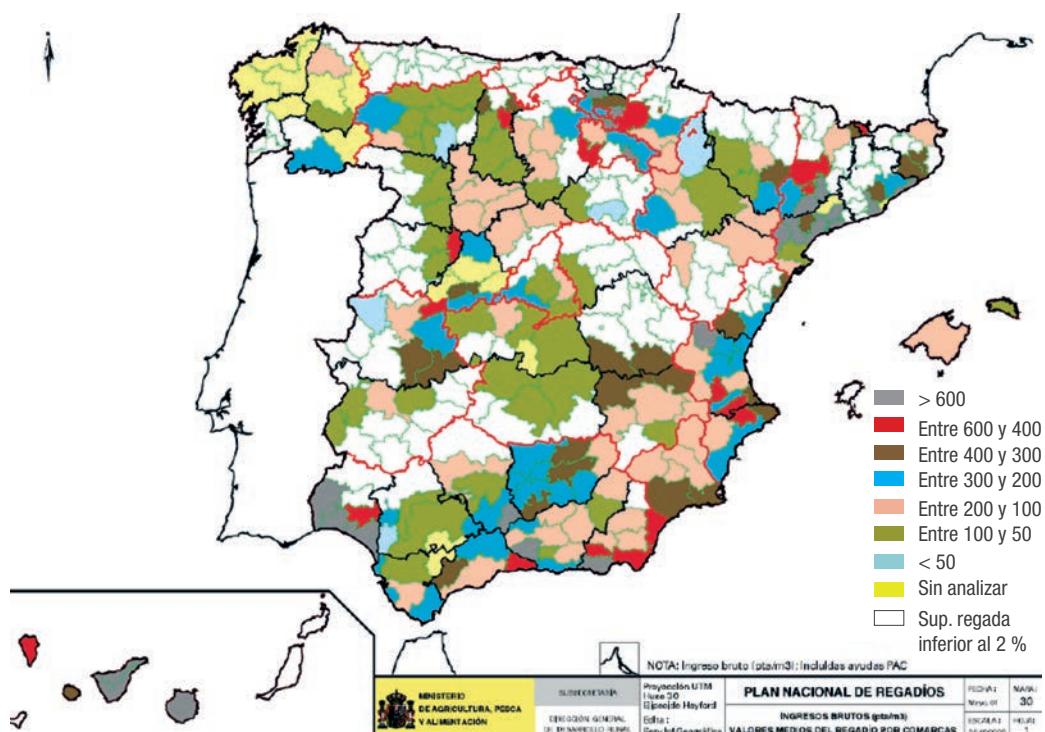


**Gráfico 21.**  
Evolución de la productividad del agua en España. En euros/m<sup>3</sup>



Fuente: Berbel y Espinosa-Tasón (2020).

**Figura 19.**  
Ingresos brutos de los regadíos por comarcas. En pta/m<sup>3</sup>



Fuente: PNR (2001).

**Tabla 19.**

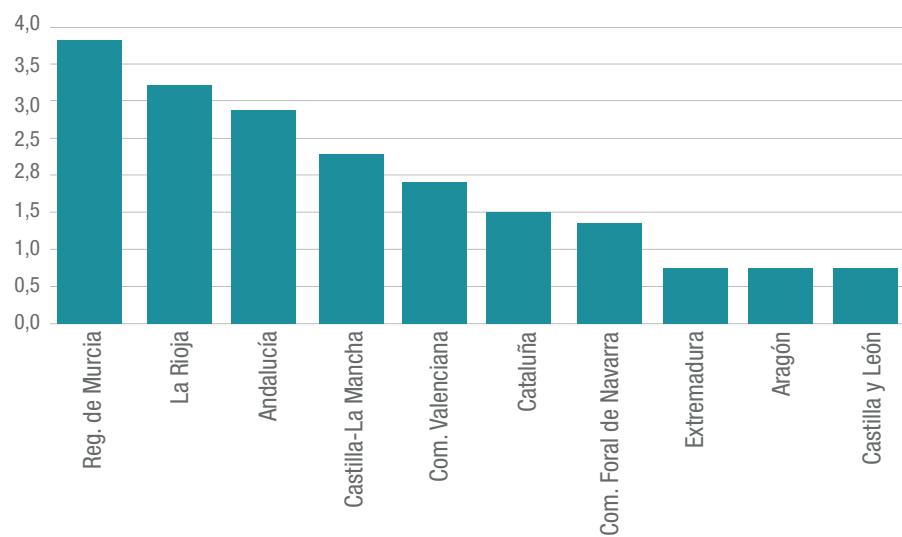
Importancia del uso del agua en el sector agrario, valor añadido bruto por unidad de demanda bruta, en los sistemas de explotación de la Comunitat Valenciana en los Horizontes 2012, 2021, 2027 y 2033

Sistemas de explotación	Productividad (euros/m <sup>3</sup> )			
	2012	2021	2027	2033
Cenia - Maestrazgo	0,91	1,06	1,16	1,26
Mijares-Plana de Castellón	0,80	0,91	0,99	1,08
Palancia - Los Valles	0,72	0,82	0,89	0,97
Turia	0,67	1,00	1,09	1,19
Júcar	0,73	0,88	0,98	1,07
Serpis	1,30	1,48	1,68	1,83
Marina Alta	1,26	1,43	1,58	1,72
Marina Baja	1,23	1,41	1,55	1,68
Vinalopó - Alacantí	1,36	1,54	1,68	1,83
<b>Total</b>	<b>0,81</b>	<b>0,99</b>	<b>1,10</b>	<b>1,19</b>

Fuente: elaboración propia.

**Gráfico 22.**

Productividad económica por volumen de agua en distintas comunidades autónomas españolas. En euros/m<sup>3</sup>



Fuente: Pulido-Velázquez *et al.* (2020).

**Tabla 20.**

Coste anual equivalente de los servicios del agua y valor unitario para el sector agrario

Demarcación	Coste del uso del agua (millones de euros)				Aspersión Agrario (hm <sup>3</sup> )	Localizado Agrario (euros/m <sup>3</sup> )
	Urbano	Agrario	Industrial	Total		
Duero	375,12	730,11	177,79	1.283,02	3.484,68	0,21
Tajo	819,90	107,29	218,90	1.146,09	1.973,45	0,05
Guadiana	246,99	219,00	5,22	471,21	2.019,39	0,11
Guadalquivir	581,53	393,69	69,08	1.044,30	3.327,84	0,12
Guadalete y Barbate	118,14	35,15	19,36	172,65	287,85	0,12
Cuencas M. Andaluzas	402,13	273,95	60,33	736,41	926,10	0,30
Segura	328,48	361,90	63,83	754,21	1.487,10	0,24
Júcar	552,66	546,61	168,44	1.267,71	2.384,79	0,23
Ebro	1.017,99	874,35	350,30	2.242,64	8.379,25	0,10
Cuenca F. de Cataluña	1.100,35	27,13	437,25	1.564,73	377,3	0,07
Islas Baleares	138,77	51,90	10,69	201,36	103,32	0,50
<b>Total</b>	<b>6.760,32</b>	<b>3.703,22</b>	<b>2.159,48</b>	<b>12.623,02</b>	<b>25.750,00</b>	<b>0,14</b>

Fuente: DGA y CEH (2018).

**Tabla 21.**

Índice de recuperación de costes financieros y totales (incluye costes ambientales) por usos del agua. En porcentaje

DDHH	Uso urbano		Uso agrario		Uso industrial		Total usos	
	Financieros	Totales	Financieros	Totales	Financieros	Totales	Financieros	Totales
Duero	50,4	46,0	70,1	45,5	77,7	71,7	64,5	49,3
Tajo	94,5	84,8	66,6	66,6	91,4	76,4	91,0	81,5
Guadiana	80,6	57,9	80,1	59,8	82,8	52,8	80,3	58,7
Guadalquivir	86,2	79,3	76,6	65,8	88,8	75,3	82,9	74,0
Cuencas M. Andaluzas	93,7	74,1	83,8	67,2	96,2	87,6	90,2	72,6
Segura	92,4	70,7	74,6	45,4	77,4	57,5	83,5	57,5
Júcar	86,3	82,6	81,4	73,0	85,8	79,3	84,2	78,0
Ebro	86,7	75,5	81,5	72,1	91,9	63,6	85,3	72,3
Cuenca F. de Cataluña	76,7	68,2	86,3	62,3	78,0	67,0	77,2	67,8
Islas Baleares	85,9	67,3	93,6	69,7	95,8	70,3	88,3	68,1
<b>Total</b>	<b>80,2</b>	<b>70,7</b>	<b>78,1</b>	<b>62,1</b>	<b>80,4</b>	<b>69,3</b>	<b>79,7</b>	<b>67,9</b>

Fuente: elaboración propia.

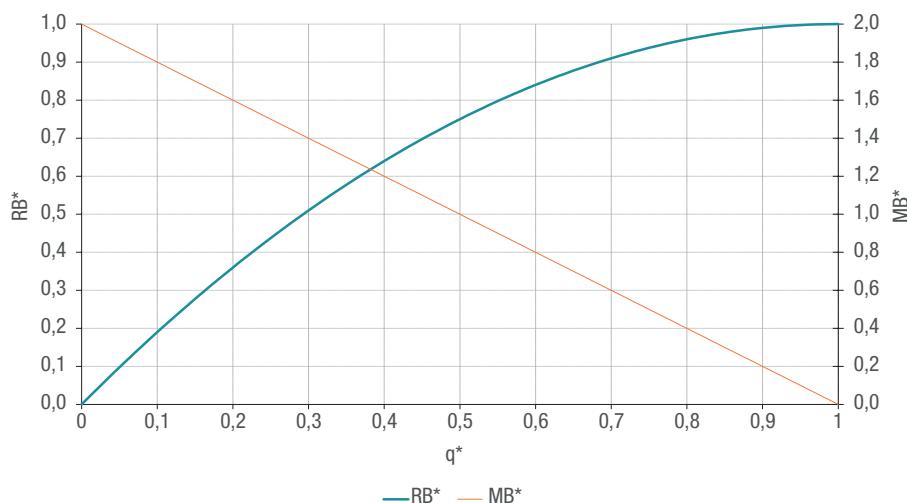
## 4.3. Reparto de recursos hídricos en situaciones de escasez. Mercados del agua

Una comunidad de usuarios o un usuario particular, con distintas orientaciones productivas, tendrá una demanda de agua de referencia,  $Q_R$  o  $q_r$ , respectivamente, que sería la que se usaría en condiciones de no escasez<sup>37</sup>. Asimismo, de aplicar esa cantidad se obtendrá un beneficio de referencia por el agua aplicada (descontando el del secano),  $RB_R$  y  $RB_r$ , respectivamente. Si hay escasez, una orientación productiva aportará una cantidad  $q$ , menor de la de referencia, y conseguirá un beneficio  $RB(q)$ . La suma de todas las orientaciones productivas tendrá una demanda  $Q$  y obtendrá un beneficio  $RB$ . Con frecuencia, se trabaja por unidad de superficie,  $RB(\text{euros/ha})$  y  $q(\text{m}^3/\text{ha})$ .

La relación  $RB(q)$  puede ajustarse con varias funciones. Alarcón *et al.* (2014a) utilizan un polinomio de segundo grado y una función exponencial. Con la primera, debido a la condición de punto doble del máximo, en variables adimensionales ( $q^* = q/q_r$  y  $RB^* = RB/RB_r$ ), todas las paráolas de segundo grado que pasan por (1,1) y por (0,0) son iguales y, por tanto, cada orientación queda determinada únicamente por sus valores de referencia  $q_r$  y  $RB_r$  (Gráfico 23). El beneficio marginal (MB) es mayor que cero, por tanto, interesa regar, pero es decreciente con el aumento del agua aplicada y lineal, por ser derivada de una ecuación de segundo grado.

**Gráfico 23.**

Productividad económica por volumen de agua en distintas comunidades autónomas españolas. En euros/ $\text{m}^3$



Fuente: elaboración propia.

<sup>37</sup> Para obtener mayores detalles de la formulación en el reparto de recursos hídricos en situaciones de escasez puede consultarse ALARCÓN *et al.* (2014) y (2014b) y ALARCÓN y JUANA (2016).



El conjunto de orientaciones productivas definidas por los pares  $(q_{ri}, RB_{ri})$ , junto con su superficie  $A_i$  o representación, permite una vez establecido un criterio de reparto de la escasez, determinar el beneficio de cada unidad y del conjunto.

La disponibilidad de un año, con respecto al de no escasez ( $Q^* = Q/Q_R$ ) permite pensar en una asignación de la misma proporción igual para todos, es decir,  $q_i^* = Q^*$ . En este caso, las funciones de la comunidad estarían también representadas en el Gráfico 23; en términos proporcionales, todas las unidades y el conjunto son iguales. Para un valor dado  $Q^* = 0,7$ , todas las unidades productivas estarían en el mismo punto  $(q_i^*, RB_i^*) = (0,70, 0,91)$  y el beneficio del conjunto también sería el 91 % del máximo  $RB_R$ .

En un reparto con cuota única, dividiendo la disponibilidad de agua por la superficie de riego, se tendría la misma cantidad  $q(m^3/ha)$ . Cada orientación al dividir ese valor por su  $q_{ri}$  obtendría un  $q_i^*$ , con este resultaría  $RB^*$  y multiplicando con  $RB_{ri}$ , finalmente  $RB_i$ . Podría darse el caso de que a alguna orientación productiva le correspondiera más agua de la que necesita, pudiéndose en este caso no usarla y repartirla entre el resto, o venderla en caso de existir un mercado.

El reparto que produce una suma de beneficios mayor (el óptimo) sería aquel en el que los beneficios marginales de todas las orientaciones productivas fuesen iguales e igual al de MB. Conocido Q o  $Q^*$ , la determinación de los  $q_i$  o  $q_i^*$  puede requerir de cálculo iterativo. Alarcón *et al.* (2014) proponen suponer un valor de MB y con MB y los valores de referencia determinar  $q_i^*$  ( $MB_i(q_i^*, q_r, RB_r)$ ), o directamente el  $q_i$  en cada orientación (la expresión resulta explícita), y por suma comprobar si coincide con el valor de Q y, en caso contrario, modificar el valor de MB, supuesto hasta la coincidencia.

En el caso de que exista un mercado, el agua tendrá un precio de mercado ( $P_m$ ) y habrá un coste de transacción  $C_t$  (tanto para el que vende como para el que compra). Se supondrá que el precio se establece de forma que todas las orientaciones cederían agua si  $P_m - C_t > MB$  o comprarían si  $P_m + C_t < BM$ . Por otra parte, no comprarán ni venderán si  $P_m - C_t < MB < P_m + C_t$ .

Conocido Q o  $Q^*$  y la respuesta productiva de todas las orientaciones, el planteamiento de resolución es parecido al comentado para el reparto óptimo, suponiendo aquí  $P_m$ , que será el resultado a obtener, junto con las dotaciones finales de cada orientación ( $q_{mi}$ ) y sus beneficios. En el caso de que no haya  $C_t$ , la solución coincide con la del reparto óptimo. En general, salvo que los  $C_t$  sean muy elevados, el resultado está próximo al reparto óptimo, por lo que cabe concluir que un mercado sería una buena solución para mejorar los beneficios globales.



## Ejemplo de aplicación a una zona regable

Se supone una zona regable con superficie de  $A_R = 9.755$  ha y con la previsión de cultivos, dotaciones y beneficios de referencia recogidos en la Tabla 22. Dentro de cada cultivo, convendría hacer diferencias en función de la dotación y/o del beneficio, sobre todo, en los cultivos con más representación de superficie, pero para reducir la información no se realiza.

**Tabla 22.**

Datos de superficies, dotaciones y beneficios de referencia de la zona regable

i	Cultivo	A(ha)	%A	qr (m <sup>3</sup> /ha)	RBr (euros/ha)	RBr/qr (euros/m <sup>3</sup> )
1	Alfalfa	78	0,80	5.907	1.750	0,296
2	Algodón	1.270	13,02	6.000	1.875	0,313
3	Almendro	68	0,70	4.945	2.000	0,404
4	Arroz	355	3,64	13.867	2.000	0,144
5	Cereales	662	6,78	1.500	500	0,333
6	Cítricos	277	2,84	5.333	6.000	1,125
7	Extensivos Invierno	796	8,16	3.240	500	0,154
8	Fresa, Fresón, Frambuesa	38	0,39	4.000	16.000	4,000
9	Forrajeras	59	0,61	1.500	750	0,500
10	Frutales	169	1,73	5.333	4.500	0,844
11	Girasol	256	2,62	4.680	600	0,128
12	Hortícolas	341	3,49	6.000	5.375	0,896
13	Invernadero	6	0,06	6.000	30.750	5,125
14	Leguminosas	168	1,72	1.500	625	0,417
15	Maíz	93	0,95	6.800	1.800	0,265
16	Olivar	3.926	40,24	2.000	1.875	0,938
17	Olivar intensivo	696	7,13	2.933	2.500	0,852
18	Patata media estación	79	0,81	6.342	3.750	0,591
19	Patata temprana	132	1,36	5.142	3.500	0,681
20	Otros	134	1,37	6.000	1.750	0,292
21	Remolacha Azucarera	81	0,83	6.000	3.000	0,500
22	Otros	24	0,24	1.440	625	0,434
23	Tabaco	49	0,50	6.875	2.750	0,400
<b>Total / medio</b>		<b>9.755</b>	<b>100,00</b>	<b>3.734</b>	<b>2.059</b>	<b>0,552</b>

Fuente: elaboración propia.



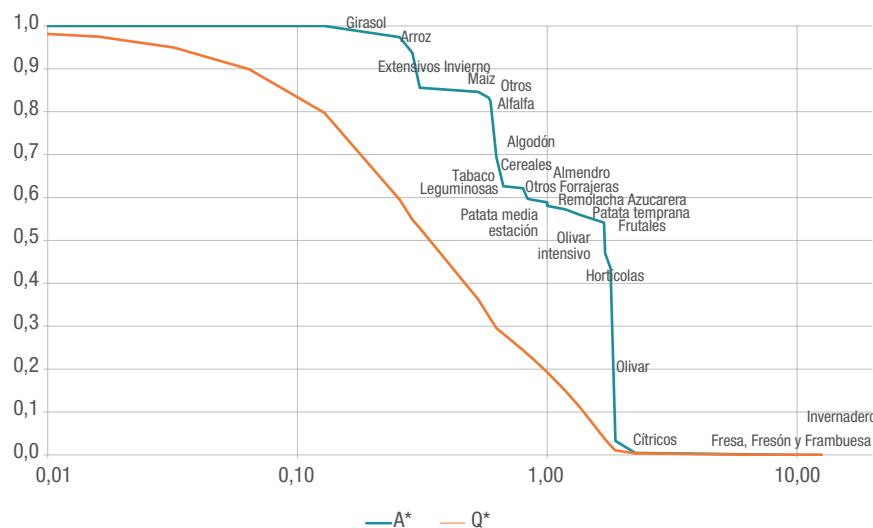
Se ha estudiado la función de beneficio (RB) de la comunidad de regantes según la dotación Q y el criterio de reparto. Asimismo, para el criterio de reparto óptimo, la relación entre la dotación Q y el MB. Para un valor concreto de dotación Q, el valor de MB de la comunidad podría ser de gran interés para valorar si a la comunidad le interesa comprar agua a una fuente externa (estación de desalación) o acometer proyectos para incrementar los recursos.

Los resultados para el reparto óptimo se muestran en el Gráfico 24. Se observa que MB aumenta a medida que se reduce la disponibilidad de agua Q\*. Así para un valor  $Q^* \approx 0,80$ , MB es algo más de 0,10 euros/m<sup>3</sup> y con valor de MB mayor que este (o un valor de  $Q^* < 0,80$ ) dejaría de regarse el girasol (el agua disponible sería mejor usarla en otros cultivos). Al ir reduciendo Q\*, aumentaría MB e irían desapareciendo otros cultivos. El orden de desaparición, con la formulación propuesta, sería el mismo orden de la relación  $RB_r / q_r$  (los valores menores serían los primeros que desaparecerían). Si tuviéramos poca agua, interesaría aplicarla en los cultivos con mayor relación  $RB_{ri} / q_{ri}$ , los cultivos de invernadero, ..., el orden contrario al de desaparición.

La función de beneficio  $RB^*$  en función de la dotación  $Q^*$  se muestra en el Gráfico 25. En ella, junto al resultado con el reparto óptimo, se han representado también el reparto proporcional y el de cuota única (con la opción de usar el agua que pueda sobrar a una orientación en las restantes o perdiéndola), así como con un mercado en el que el  $C_r$  sea el 10 % del precio del mercado del agua y se reparta a partes iguales entre vendedor y comprador. Para este último caso se ha supuesto que la dotación inicial era la de cuota única.

**Gráfico 24.**

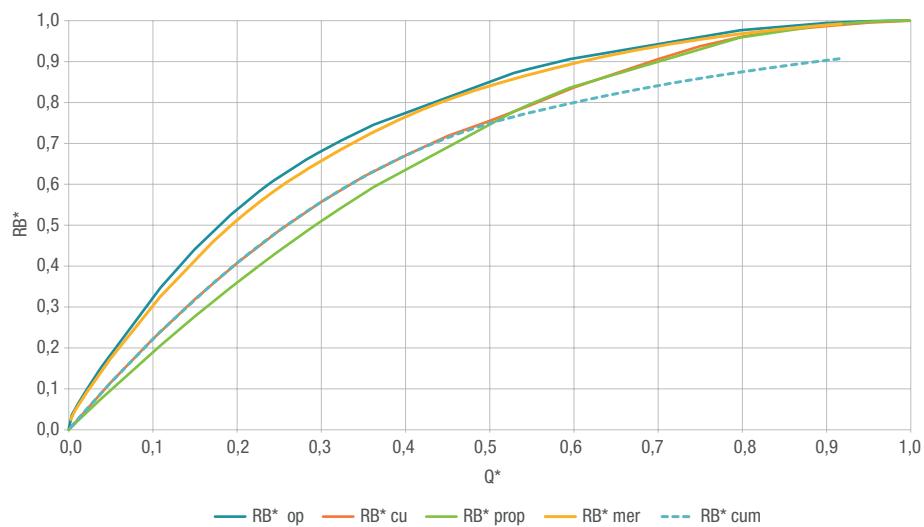
Dotación disponible (Q\*) y beneficio marginal (MB) y superficie con riego (A\*) en el reparto óptimo. En euros/m<sup>3</sup>



Fuente: elaboración propia.

**Gráfico 25.**

Función de beneficio para toda la comunidad en función de la dotación disponible y el método de reparto



\* op: óptimo; cu: cuota única aprovechando agua si sobra; cum: cuota única perdiendo agua si sobra; mer: mercado.

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 23 se muestra el resultado más detallado para el caso de  $Q^*=0,5$  con mercado. El mercado puede ser una herramienta eficiente para mejorar los resultados del conjunto. Aquí, se observa que hay orientaciones productivas que ganan más en períodos de escasez de recursos, vendiendo el agua en los años sin déficit con sus cultivos: cereales, extensivos de invierno, forrajeras y leguminosas, fundamentalmente. Si bien, los márgenes de dichos cultivos son bajos y los beneficios absolutos también. Lógicamente, en valores absolutos, los más beneficiados son los cultivos más rentables: invernaderos, fresas y cítricos, especialmente.

La forma de RB tiene su importancia como puede verse en la referencia citada con la función potencial. En el caso de usar una función lineal, el beneficio marginal sería constante y, en ese caso, interesaría no regar. No obstante, si la uniformidad no es perfecta, al considerar el déficit saldrían una función parecida a la considerada en las proximidades del valor de referencia.

**Tabla 23.**Resultados con mercado para un valor de  $Q^*=0,50$ 

i	Cultivo	Reparto precio cuota única			Mercado. $P_m=0,331$ euros/m <sup>3</sup>				
		$q_{med}^*$	1867	m <sup>3</sup> /ha	$q^*$	$RB^*$	$MB$ (euros/m <sup>3</sup> )	$C/P_m = 0,10$	$q^*-q_0^*$
1	Alfalfa	0,316	0,532	0,405	0,385	0,537	0,365	0,069	0,005
2	Algodón	0,311	0,525	0,431	0,417	0,537	0,365	0,106	0,011
3	Almendro	0,378	0,613	0,504	0,549	0,642	0,365	0,172	0,030
4	Arroz	0,135	0,251	0,250	0,000	0,278	0,288	-0,135	0,027
5	Cereales	1,245	1,000	0,000	0,553	1,419	0,298	-0,692	0,419
6	Cítricos	0,350	0,578	1,462	0,838	0,816	0,365	0,488	0,238
7	Extensivos invierno	0,576	0,820	0,131	0,034	1,115	0,298	-0,543	0,294
8	Fresa, fresón y frambuesa	0,467	0,716	4,266	0,954	0,953	0,365	0,488	0,238
9	Forrajeras	1,245	1,000	0,000	0,702	1,235	0,298	-0,543	0,235
10	Frutales	0,350	0,578	1,097	0,784	0,766	0,365	0,434	0,188
11	Girasol	0,399	0,639	0,154	0,000	0,928	0,256	-0,399	0,289
12	Hortícolas	0,311	0,525	1,234	0,797	0,761	0,365	0,485	0,236
13	Invernadero	0,311	0,525	7,061	0,964	0,952	0,365	0,653	0,427
14	Leguminosas	1,245	1,000	0,000	0,642	1,303	0,298	-0,603	0,303
15	Maíz	0,275	0,474	0,384	0,311	0,475	0,365	0,037	0,001
16	Olivar	0,933	0,996	0,125	0,841	1,004	0,298	-0,093	0,009
17	Olivar intensivo	0,637	0,868	0,620	0,786	0,890	0,365	0,150	0,022
18	Patata media estación	0,294	0,502	0,834	0,692	0,660	0,365	0,397	0,158
19	Patata temprana	0,363	0,594	0,867	0,732	0,731	0,365	0,369	0,136
20	Otros	0,311	0,525	0,402	0,375	0,530	0,365	0,064	0,004
21	Remolacha	0,311	0,525	0,689	0,635	0,631	0,365	0,324	0,105
22	Otros	1,296	1,000	0,000	0,656	1,322	0,298	-0,640	0,322
23	Tabaco	0,272	0,469	0,583	0,544	0,544	0,365	0,273	0,074
<b>Medio</b>		<b>0,500</b>	<b>0,749</b>		<b>0,500</b>	<b>0,841</b>		<b>0,000</b>	<b>0,092</b>

Fuente: elaboración propia.

#### 4.4. Viabilidad de las medidas de modernización<sup>38</sup>

Las medidas de modernización de regadíos implican una modificación en el uso del agua y de la energía, se necesitan inversiones y cambian los gastos y beneficios de las explotaciones. La evaluación conjunta para valorar si está o no justificada la actuación requiere de la estimación de ciertos parámetros de referencia para que todas las variables implicadas puedan ser computadas en las mismas unidades y obtener el signo positivo o negativo del resultado. Dado que los parámetros estimados estarán sujetos a incertidumbre y los valores reales cambiarán de unas zonas a otras, y con el tiempo, es conveniente establecer las relaciones y los valores que harían variar el signo para

<sup>38</sup> ALARCÓN *et al.* (2016).



los parámetros esperados. Para mostrar el método se usarán algunos parámetros justificados en Alarcón *et al.* (2016) o seleccionados de las fuentes allí referenciadas. En la Tabla 24 se recogen algunos, entre ellos, el coste de inversión unitario para la transformación de riego por superficie en riego por goteo,  $C_{Iu}=8.993$  euros/ha, con un coeficiente de variación  $CV=0,16$ .

**Tabla 24.**

Costes medios y rangos para la modernización de regadíos. En euros  $ha^{-1}$

Tipo de modernización	Inversión	Coste anual*
Sustitución de riego por gravedad por riego localizado	8.993 (5.922 – 14.035)	
Modernización de redes de distribución y reparto	6.039 (4.214 – 9.835)	286 (202 – 370)
Cambio de sistema de aplicación en parcela: goteo	2.954 (1.708 – 4.200)	
Sustitución de riego por gravedad por riego por aspersión	7.916 (5.028 – 13.507)	
Modernización de redes de distribución y reparto	6.039 (4.214 – 9.835)	
Cambio de sistema de aplicación en parcela: aspersores	3.210 (2.500 – 3.920)	298 (204 – 393)
Cambio de sistema de aplicación en parcela: pivots	1.542 (800 – 2.285)	
Adecuación de riegos por gravedad	4.637 (3.591 – 6.815)**	109 (83 – 135)

\* Coste anual de funcionamiento, conservación y mantenimiento.

\*\* Incluye concentración parcelaria, nivelación mediante subsolado, embalse y capaceo, construcción de acequias, caminos y desagües perimetrales.

Fuente: Alarcón *et al.* (2006).

Será un análisis simplificado. Es necesario saber que concepto como 'ahorro de agua', entre otros, es complejo y los beneficios o los costes de los retornos deberían ser considerados. También hay ventajas e inconvenientes de la situación modernizada, frente a la situación sin modernizar, que son difíciles de valorar económicamente. Estos aspectos y otros, que no serán tenidos en cuenta en algunos casos, podrían ser incorporados en el análisis, que se realizará con ciertos artificios, pero no se entrará en detalles.

Sean unas necesidades de agua por unidad de superficie y campaña  $E_t$  ( $m^3/ha/año$ ), una eficiencia en el uso de agua o rendimiento  $R$ , un consumo energético por unidad de volumen  $E_v$  ( $kW\cdot h/m^3$ ), un coste de inversión  $C_i$  (euros/ha) y un margen neto anual (beneficios menos costes) de explotación  $B_a$  (euros/ha/año). Cada una de estas variables toma unos valores para la situación sin modernizar (se usará el subíndice 1) y modernizada (subíndice 2). El paso de un escenario a otro implica un ahorro de agua, al que se le asignará un  $BM$  (euros/ $m^3$ ) a cada  $m^3$  ahorrado o si se prefiere un coste marginal para conseguirlo de una fuente alternativa. Cada situación tendrá un consumo energético, al que habrá que aplicar el coste de cada unidad de energía  $C_{uE}$  (euros/ $kWh$ ). Para comparar coste de inversión con costes anuales se usará una anualidad  $a$  ( $año^{-1}$ ).

El ahorro unitario de agua,  $A_u$  ( $m^3/ha/año$ ) depende de las necesidades y de los rendimientos del uso del agua ( $R_1$  y  $R_2$ ). Estos rendimientos también dependen del aumento de energía unitario,  $\Delta E_u$  ( $kWh/ha/año$ ). Además, considerando el incremento unitario del coste de inversión  $\Delta C_{Iu}$  (euros/ha, con su  $a$  y el incremento de beneficios netos de explotación  $\Delta B_{au}$ , la segunda opción será preferible a la primera si los beneficios son mayores a los costes. Es decir:

$$A_u \cdot BM + \Delta B_{au} - \Delta E_u \cdot C_{uE} - \Delta C_{Iu} \cdot a > 0$$



Situaciones simplificadas aparecen si se anulan o no intervienen algunos términos. En particular, los siguientes:

## Margen de explotación vs. inversión

Sea un caso donde no se consigue ahorrar agua ( $A_u = 0$ ) o donde no se obtiene beneficio por ella ( $BM = 0$ ) y que no hay cambio de los gastos energéticos (por ejemplo, se moderniza un riego por superficie sin transformarlo) o que estos se incorporan en  $\Delta B_{au}$ . Así, de suponer una inversión unitaria  $C_{lu} = 9.000$  euros/ha, valor más o menos medio en España, con una vida útil  $n = 25$  años y una tasa de descuento  $r = 0,04$  (valores de referencia según el RD 287/2006, por el que se regulan las obras urgentes de mejora y consolidación de regadíos), resulta una  $a = 0,064$  año<sup>-1</sup> y puede así determinarse el incremento de margen que justificaría esa inversión:

$$\Delta B_{au} = \Delta C_{lu} \cdot a = 9.000 \cdot 0,064 = 576 \text{ euros/año}$$

El valor es algo mayor que el que por término medio se ha obtenido en algunos estudios realizados en las nuevas explotaciones<sup>39</sup>, lo que indicaría que el incremento de los beneficios de la explotación, por si solos, no está compensando las inversiones realizadas. Obsérvese que, aunque el beneficio medio fuese superior, supóngase  $\Delta B_{au} = 700$  euros/ha/año, la desuniformidad entre regantes determinaría que para algunos de ellos no les resulte rentable. Así, de suponer una distribución normal  $\Delta B_{au}$ , con  $CV = 0,25$  –independientemente de la inversión– igual para todos, el porcentaje para al que no le resultara ventajoso sería del 24 %.

Conviene recordar que individualmente cada regante puede tener un coste de oportunidad para el dinero y que, en estos momentos, en el que están subiendo los intereses, convendría aumentar la  $a$ , en cuyo caso, también aumentaría el  $\Delta B_{au}$  que lo justificase.

## Ahorro de agua vs. consumo de energía

La ecuación anterior puede ponerse en función de los rendimientos de la situación sin modernizar y modernizada ( $R_1$  y  $R_2$ ) o de los volúmenes usados en las respectivas situaciones ( $V_{u1}$  y  $V_{u2}$ ). En el caso de tener las mismas necesidades de evapotranspiración,  $E_t = V_{u1} \cdot R_1 = V_{u2} \cdot R_2$ , resulta:

$$\frac{R_2}{R_1} - 1 = \frac{V_{u1}}{V_{u2}} - 1 > \frac{\Delta C_{lu} \cdot a - \Delta B_{au}}{BM \cdot E_t / R_2} + \left(1 - \frac{E_{v1}}{E_{v2}}\right) \cdot \frac{E_{v2} \cdot C_{uE}}{BM}$$

La Tabla 25 se ha realizado con la finalidad de ilustrar y de servir a la vez de calculadora. La entrada normal, con  $R_1$  y  $(R_2/R_1)-1$ , determina el valor mínimo de  $R_2$  para que la medida resulte de interés. Así con  $R_1 = 0,60$  y  $(R_2/R_1)-1 = 0,20$ , el valor de  $R_2 > 0,72$ .

• • • • • • •

<sup>39</sup> ALARCÓN *et al.* (2016).



Se han añadido las filas 2 y 3 para sustituir la entrada principal,  $(R_2/R_1)-1$ , por la energía por unidad de volumen  $E_{v2}$  o por el coste de inversión unitario  $C_{lu}$ , asumiendo unos valores de referencia. Así, para estudiar el ahorro de agua que justifica un incremento energético se ha considerado que  $\Delta C_{lu} \cdot a = \Delta B_{au}$  y  $E_{v1} = 0$ , y que la relación  $C_{ue}/BM$  es como la obtenida con los valores  $BM = 0,29$  euro/m<sup>3</sup> y  $C_{ue} = 0,074$  euro/kWh. De esta forma, el valor  $(R_2/R_1)-1 = 0,20$ , resulta con  $E_{v2} = 0,78$  kWh/m<sup>3</sup> (o con una altura de elevación  $H = 230$  m, si el rendimiento de las bombas es  $\eta = 0,80$ ). La proporcionalidad de  $(R_2/R_1)-1$  con  $C_{ue}/BM$  hace que, si este último valor es el doble (bien porque se duplique  $C_{ue}$  o porque se reduzca a la mitad  $BM$ ), el valor de  $E_{v2}$ , que corresponde al mismo valor, es la mitad del indicado.

Así, si la altura de elevación es  $H = 230$  m y el rendimiento  $R_1 = 0,60$ , sería necesario un rendimiento después de la modernización mayor de 0,72. En algunos planes de cuenca para los riegos por goteo modernizados se ha estimado un rendimiento global promedio de 0,79 (incluyendo el de parcela y el de conducción), lo que indicaría que si un regante tiene este valor medio, estaría justificada la modernización. Pero, si los costes de la energía suben al doble (0,148 kWh/m<sup>3</sup>) o si el beneficio marginal se reduce a la mitad (0,145 euros/m<sup>3</sup>), entonces con el mismo valor de  $R_1$ , en vez de con la entrada de  $R_2/R_1-1 = 0,20$ , habría que entrar con 0,40, y  $R_2$  debería superar a 0,84 y, en este caso, no estaría justificada (Tabla 25).

**Tabla 25.**

Rendimientos iniciales ( $R_1$ ) y finales ( $R_2$ ) del punto de igualación caracterizado por el ahorro unitario de agua,  $R_2/R_1-1$ , o sus equivalentes consumos energéticos o costes de inversión, con los valores de referencia indicados

Supuestos	$R_2/R_1-1$	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,40	0,50	0,60	0,75	1,00
		$R_1$	$R_2$									
	0,30	0,32	0,33	0,35	0,36	0,38	0,39	0,42	0,45	0,48	0,53	0,60
	0,35	0,37	0,39	0,40	0,42	0,44	0,46	0,49	0,53	0,56	0,61	0,70
	0,40	0,42	0,44	0,46	0,48	0,50	0,52	0,56	0,60	0,64	0,70	0,80
	0,45	0,47	0,50	0,52	0,54	0,56	0,59	0,63	0,68	0,72	0,79	0,90
	0,50	0,53	0,55	0,58	0,60	0,63	0,65	0,70	0,75	0,80	0,88	1,00
	0,55	0,58	0,61	0,63	0,66	0,69	0,72	0,77	0,83	0,88	0,96	
	0,60	0,63	0,66	0,69	0,72	0,75	0,78	0,84	0,90	0,96		
	0,65	0,68	0,72	0,75	0,78	0,81	0,85	0,91	0,98			
	0,70	0,74	0,77	0,81	0,84	0,88	0,91	0,98				
	0,75	0,79	0,83	0,86	0,90	0,94	0,98					
	0,80	0,84	0,88	0,92	0,96	1,00						
	0,85	0,89	0,94	0,98								
	0,90	0,95	0,99									
2) $BM/C_{ue} = 0,29/0,074$ $kWh/m^3$	$E_{v2}$ (kWh m <sup>-3</sup> )	0,20	0,39	0,59	0,78	0,98	1,18	1,57	1,96	2,35	2,94	3,92
y $\eta = 0,80$	$H$ (m)	58	115	173	230	288	346	461	576	691	864	1152
3) $\Delta E_u = \Delta B_{au} = 0$ , $R_2 = 0,79$ $BM \cdot EtR_2/a = 23,604$	$C_{lu}$ (euros ha <sup>-1</sup> )	1.180	2.360	3.541	4.721	5.901	7.081	9.442	11.802	14.162	17.703	23.604
	$F$ (9.000, 0,16)	0,000	0,000	0,000	0,001	0,016	0,091	0,620	0,974	1,000	1,000	1,000

Fuente: elaboración propia.



Si la variable incierta está lejos de la del punto de igualación, cabe pensar que la decisión ofrece pocas dudas, pero si se está cerca, sí. Como todos los regantes no tendrán los mismos valores, en situaciones dudosas para el colectivo, individualmente a algunos les interesarán y a otros no.

## Ahorro de agua vs. costes de inversión

En este caso, como alternativa a la entrada  $(R_2/R_1)-1$ , se propone entrar con el coste de inversión  $C_{lu}$ . Se supondrá ahora que la energía no se incrementa,  $\Delta E_u = 0$  ( $E_{v1} = E_{v2}$ ), ni tampoco los beneficios de la explotación,  $\Delta B_{au} = 0$ . Además, que se tiene una relación  $BM \cdot Et/(R_2 \cdot a) = 23.604$ , obtenida con unas necesidades netas de  $Et = 4.116 \text{ m}^3/\text{ha/año}$  (valor medio estimado para España) y un rendimiento  $R_2 = 0,79$ , además de los valores anteriores de beneficio marginal  $BM = 0,29 \text{ euros/m}^3$  y de  $a = 0,064 \text{ año}^{-1}$ . Así, de suponer un rendimiento de partida  $R_1 = 0,60$ , el valor de  $(R_2/R_1)-1$ , que daría  $R_2 = 0,79$ , sería  $R_2/R_1-1 \cong 0,32$ , que se obtendría con un  $C_{lu} \cong 7.475 \text{ euros/ha}$ . Al haber usado  $R_2 = 0,79$  para determinar  $C_{lu}$ , los resultados serán aproximados si el resultado final de este difiere, el valor a usar de  $C_{lu}$  es inversamente proporcional a  $R_2$ . En la práctica, las expresiones son preferibles, no obstante, en la tabla se observan algunos resultados.

Si el coste  $C_{lu}$  sigue una distribución normal, con valor medio de 9.000 euros/ha y un  $CV = 0,16$ , la probabilidad de que  $C_{lu}$  fuese menor de 7.475, sería  $F = 0,145$  (Tabla 25). Como consecuencia, únicamente el 14,5 % de las modernizaciones hubiesen sido rentables con los valores de referencia y son independientes las variables involucradas.

Obsérvese que si el incremento del beneficio de explotación fuese  $\Delta B_{au} = 288 \text{ euros/ha}$ , valor medio estimado en una zona regable española<sup>40</sup>, el valor de entrada  $(R_2/R_1)-1$  anterior habría que aumentarlo en una cantidad  $\Delta B_{au}/(BM \cdot Et/R_2) = 0,19$ . Es decir,  $R_2/R_1-1$  pasaría de 0,32 a 0,51. Con la nueva entrada serían rentables las modernizaciones con un coste menor a 11.800 euros/ha, que, con la distribución anterior, serían mayoritarias, el 97,4 %. Queda, por tanto, patente la importancia de incrementar los márgenes de explotación. Asimismo, se vuelve a recordar la relevancia del BM del agua si permite ahorrarla. Así, si se redujese a la mitad, en vez del  $R_2/R_1-1 = 0,32$ , resultaría  $R_2/R_1-1 = 0,16$ , que se correspondería con  $C_{lu} = 3.737 \text{ euros/ha}$ . La situación mejora algo si se suma el 0,19, correspondiente al incremento de los beneficios de explotación, ya que daría 0,35, que se corresponde con  $C_{lu} = 8.200 \text{ euros/ha}$ .

## Ahorro de agua vs. costes de inversión y de energía

En los apartados anteriores se consideraron los costes de energía y la inversión por separado, no obstante, se suelen dar simultáneamente. Además, en la energía se ha contemplado únicamente el factor variable que depende del volumen elevado. El valor correspondiente a la potencia contratada se podría tratar reduciendo la parte correspondiente a los costes de explotación. De evaluar los datos del incremento de energía analizado, que equivale a una entrada  $R_2/R_1-1 = 0,20$ , y un coste de

• • • • • • • •  
<sup>40</sup> ALARCÓN *et al.* (2016).



inversión al que le corresponde una entrada  $R_2/R_1 - 1 = 0,38$ , la entrada conjunta (por energía más inversión) sería con  $R_2/R_1 - 1 = 0,20 + 0,38 = 0,58 \cong 0,60$ , lo que implicaría que si  $R_2 = 0,79$ , esa transformación únicamente sería rentable si el rendimiento de partida fuese menor de  $R_1 = 0,50$ .

En las ecuaciones, supuestos unos valores de referencia, puede obtenerse el valor de la variable que se considere incierta. La Tabla 25 admite otras formas de entrada y salida, que podrían incrementarse de agregar filas, pero simplemente se ha buscado ilustrar y mostrar la sensibilidad.

Cabe concluir que los resultados son sensibles a los valores de referencia y que, para justificar las modernizaciones con el ahorro de agua, además de los rendimientos que expliquen ese ahorro, es también muy determinante el BM de esa agua ahorrada. Si se considera que cabe esperar que aumente con el tiempo, este ayudará a justificar las modernizaciones.

## 5. Perspectivas futuras y conclusiones

### 5.1. Mejora de las instalaciones y sus aplicaciones

Un tema futuro es la facilidad que permiten las nuevas tecnologías para procesar la información y actuar en tiempo real de forma automática, sin la necesidad de intervención humana. Al pasar el regante de una actitud activa a una pasiva de simple control, la programación de sus riegos, junto con el del resto de los usuarios, y su ejecución automática puede mejorar el uso de las instalaciones potencialmente y permitir un menor uso de la energía. Las restricciones o preferencias que impongan cada uno determinarán las reducciones que puedan alcanzarse, por ello, hay que informarlos de los costes repercutidos, si los tiene, de sus decisiones.

Mapas digitales de la superficie con sus cotas, información sobre temperaturas y humedad del suelo o del cultivo, estado fisiológico del cultivo o incluso evapotranspiración o producción de biomasa, con datos que pueden ser diarios –o incluso pudiendo disponer de más al día si hay varios satélites–, es una información accesible, impensable hasta hace unos años y que cada vez será mejor y más útil, pues las series temporales que se empieza a tener ya tienen una duración apreciable.

La diferenciación espacial que permiten las imágenes obtenidas desde satélite o bien desde drones es otra herramienta complementaria que seguramente revolucione la agricultura y dentro de ella el riego. Existen ya pivotes con emisores controlados remotamente que aportan más o menos agua o tratamientos cuando pasan por distintas zonas. La interpretación del estado fisiológico y de la estimación de las necesidades de agua es ya una realidad, que se incrementa y mejora día a día. Las mejoras de las imágenes y de las metodologías producen sinergias mutuas.

En evapotranspiración un primer producto global de interés, el MOD16, basado en el modelo de Mu *et al.* (2007 y 2011), aporta datos del evapotranspiración potencial y real, con una resolución de 500 m cada 8 días. Con otros productos MODIS como los índices de vegetación y de albedo con resoluciones similares, junto con otros como el MOD11A1 o el MYD11A1, se ofrecen datos diarios de la temperatura superficial, de la emisividad y de las estaciones meteorológicas, por lo que se han



propuesto métodos para obtener estimaciones diarias de la evapotranspiración en un punto<sup>41</sup> de una zona de riego<sup>42</sup>. En la actualidad, un producto global es «ECOSTRESS Evapotranspiration PT-JPL Daily L3 Global 70 m V001»<sup>43</sup>. Con Landsat, con resoluciones cada 30 m, o con Sentinel-2, dentro de la misión Copérnico, de la Agencia Espacial Europea, que obtiene imágenes con una resolución de hasta 10 m cada 5 días, junto con otros satélites, que obtienen resoluciones temporales diarias, se desarrollan modelos para estimar la evapotranspiración diaria, con estas altas resoluciones espaciales<sup>44</sup>. El uso de drones, cada vez más asequibles, permite resoluciones mayores. Todos estos productos comentados están disponibles de forma gratuita. En definitiva, cabe esperar una mejora de los métodos y de las resoluciones, que serán de interés para la precisión de los balances hidrológicos y con ello para el seguimiento del agua.

En el caso del uso de aguas con un contenido electrolítico es necesario el lavado de sales para evitar su acumulación y así mantener la fertilidad del suelo. Con objeto de evitar el lavado de elementos muy solubles y potencialmente dañinos como los nitratos, es conveniente seleccionar tanto los momentos de aplicación de los nutrientes como los momentos de llevar a cabo los lavados. El riego por goteo no está bien adaptado para aplicar fracciones de lavado. Seguramente, en los casos que haya que realizarlos, sería mejor hacerlos en momentos concretos, aplicando el agua con otros métodos de riego. Convendría investigar más la posible instalación de drenajes con dicho fin para que únicamente entraran en funcionamiento cuando se apliquen cantidades de agua importantes y el suelo se sature. Así, se podrían dirigir los efluentes hacia zonas que no produjesen daño e incluso permitir el reciclado del agua, si bien habría que eliminar las sales porque si no cada vez estarían más concentradas.

Los sensores puntuales que miden la humedad del suelo o el estado de las plantas seguirán usándose, pero en general, por su alto coste y su escasa representatividad, cabe esperar que se instalen en pequeñas cantidades y ubicados en lugares que alerten de situaciones o confirmen los resultados obtenidos por simulación, o bien por otros métodos que informen de todo el conjunto y diferencien sus partes.

Desde el punto de vista energético, una primera reducción vendrá de forma indirecta asociada a los menores volúmenes aplicados por una mejor estimación de necesidades, el incremento del coste del agua y los costes por las afecciones ambientales. Para reducir la energía por unidad de volumen, un elemento clave es instalar un convertidor de frecuencia en las fincas. De esta forma es posible adaptarse a las necesidades energéticas de cada momento que, hasta ahora, únicamente estaban presentes en las estaciones de bombeo de las redes de distribución de la comunidad. Pero, como se ha analizado, una red general que aporte toda la energía que necesita cada regante no es eficiente. Por tanto, una solución para evitar esta ineficiencia energética es la distribución desde la estación de bombeo en baja, entendiendo con ello que a cada regante se le suministra agua con una presión menor de la necesaria y que ellos deben realizar un rebombeo. Así, el regante con su propia bomba con variador puede conseguir productividad en su propia finca, aspecto que no se consigue con una boca o hidrante pasivo como los que se instalan ahora. Por otra parte, el regante estaría incentivado

<sup>41</sup> FISHER *et al.* (2008).

<sup>42</sup> MOYANO *et al.* (2018).

<sup>43</sup> HALVERSON *et al.* (2019).

<sup>44</sup> Como lo muestran los trabajos de ALLAM *et al.* (2021) y de GUZINSKI *et al.* (2020).