

Estrategias para gestionar la escasez de agua mediante soluciones digitales en Andalucía



Informaciones del entregable

Número de entregable	E 2.4.2
Fecha de entrega establecida	Junio 2025
Fecha de entrega real	Septiembre 2025
Líder del proyecto	UCO

Autores		
Nombre	Apellido/s	Entidad
Pilar	Montesinos Barrios	Universidad de Córdoba
Emilio	Camacho Poyato	Universidad de Córdoba

Historial de modificaciones			
Versión	Fecha	Nombre	Apellido/s

Tabla de contenido

1	Introducción	5
2	La administración hidráulica en Andalucía.....	7
2.1	La Consejería de Agricultura, Pesca, Agua y Desarrollo Rural.....	8
2.2	La Confederación Hidrográfica del Guadalquivir.....	9
3	Derechos de uso.....	10
3.1	Autorización administrativa	10
3.2	Concesión administrativa	II
4	Plan especial de sequía de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir	12
4.1	Indicadores de sequía prolongada y de escasez.....	14
4.2	Planes de actuación en función de la gravedad de la escasez	15
4.3	Cesión de derechos	20
5	Estrategias para mejorar la eficiencia del uso del agua en episodios de sequía	21
5.1	Estrategias de mejora de la eficiencia del uso de agua a escala de CCRR	21
5.1.1	Instalaciones hidráulicas.....	21
5.1.2	Manejo de instalaciones las instalaciones de hidráulicas.....	22
5.1.3	Aspectos agronómicos	22
5.2	Estrategias de mejora de la eficiencia del uso de agua a escala de finca.....	23
5.2.1	Instalaciones de riego.....	23
5.2.2	Manejo del riego	26
5.2.3	Aspectos agronómicos	27
6	Estrategias digitales para afrontar con más eficacia los episodios de sequía.....	28
6.1	Inventario de cultivos sobre sistemas de información geográfica y teledetección	29
6.2	Instrumentos digitales de manejo, seguimiento y control del riego en situación de sequía.....	30
6.2.1	Estimación de las necesidades de agua de riego a partir del cálculo de la evapotranspiración del cultivo y programación del riego	30
6.2.2	Uso de sensores de apoyo a las decisiones de riego	31
6.2.3	Teledetección: Satélites y drones.....	33
6.2.4	Sistemas de medida y control del riego: contadores y manómetros digitales.....	34

6.2.5	Sistemas avanzados de gestión del riego: Sistemas predictivos y Gemelos digitales	35
7	Propuestas de mejora	37

I Introducción

La sequía es un fenómeno recurrente, que no es específico de ningún tipo particular de clima. Se produce en todos los continentes y puede variar en intensidad, duración y escala espacial. Las sequías comienzan con un déficit de precipitaciones; si este déficit persiste, las sequías afectan a los suelos, ríos y acuíferos. Finalmente, todo el ciclo del agua se ve interrumpido y el uso del agua, tanto natural como humano, se ve afectado. La gravedad de la sequía depende no solo de su duración, la intensidad del déficit de precipitaciones y su extensión espacial, sino también de las necesidades de agua de las actividades humanas y de los demás seres vivos, especialmente la vegetación. Si una sequía tiene impactos depende del nivel de vulnerabilidad de los sistemas afectados, ya que los impactos se percibirán de manera diferente por diferentes grupos sociales y sectores, incluso dentro del mismo evento de sequía. La sequía se distingue de la aridez por su limitación temporal y se distingue de la escasez de agua por ser un fenómeno exclusivamente natural.

La gestión de los riesgos asociados a la sequía es compleja, ya que implica múltiples sectores, escalas y temporalidades. Esto requiere la participación coordinada de instituciones y actores diversos, como ministerios, autoridades locales, sector privado, investigadores y grupos vulnerables, en aspectos como la preparación, el seguimiento, la alerta temprana, la mitigación y la evaluación. La transición de una gestión reactiva a una proactiva implica rediseñar los marcos institucionales para anticiparse, en lugar de responder solo a las crisis. Mientras que países con sequías frecuentes pueden optar por instituciones permanentes, otros pueden tener estructuras flexibles que se activen según sea necesario. Esta planificación debe equilibrar estabilidad y adaptabilidad, teniendo en cuenta los impactos del cambio climático y la variabilidad de las sequías. La elaboración de políticas sobre la sequía y planes de prevención puede resultar una tarea difícil pero el resultado de este proceso puede aumentar considerablemente la resiliencia de los sectores afectados.

En este escenario de disminución de los recursos hídricos y sequías recurrentes, una gestión adecuada del riego requiere actuar en dos direcciones: reduciendo consumos y racionalizando usos. Con respecto al regadío, las nuevas tecnologías deben permitir la optimización del manejo del riego, el aumento de la productividad de los cultivos y la

minimización del impacto ambiental del mismo. A nivel de parcela, por ejemplo, una de las primeras medidas para gestionar la escasez de agua es la implementación de sistemas de riego eficientes. El riego por goteo y el riego por aspersión junto con el monitoreo de la humedad del suelo y de variables climáticas permiten ajustar el riego a las necesidades de los cultivos en cada estadio de crecimiento permitiendo optimizar al máximo el uso del agua.

En general, la transformación digital en la gestión del agua de riego implica la aplicación de diversas estrategias y tecnologías innovadoras. Desde la implementación de sistemas de monitorización basados en sensores y teledetección hasta el uso de inteligencia artificial y análisis avanzado de datos.

2 La administración hidráulica en Andalucía

La Directiva Marco del Agua (DMA) establece el marco comunitario para la gestión y protección de las aguas en la Unión Europea. Esta directiva establece que la gestión del agua debe realizarse a nivel de cuenca hidrográfica, en lugar de límites administrativos o políticos. Esto implica que cada demarcación hidrográfica debe tener un plan de gestión de cuenca. Por otro lado, el Texto Refundido de la Ley de Aguas (TRLA), aprobado por el Real Decreto Legislativo 1/2001, establece que la gestión del agua en España debe realizarse a través de demarcaciones hidrográficas, las cuales abarcan la zona terrestre y marina de una o varias cuencas hidrográficas vecinas y las aguas de transición, subterráneas y costeras asociadas a dichas cuencas. Esta ley establece la estructura y funciones de los organismos de cuenca, definiendo sus competencias y responsabilidades en la gestión de los recursos hídricos. Así mismo, el TRLA establece que, en circunstancias de sequías extraordinarias o concurrencias de situaciones anómalas, es el Organismo de cuenca quien establecerá las medidas que sean precisas en relación con la utilización del dominio público hidráulico.

Los recursos hídricos andaluces se distribuyen entre 6 demarcaciones hidrográficas, 3 de carácter intercomunitario: Guadalquivir, Guadiana y Segura con 90%, 10% y 9% de su territorio dentro de Andalucía y, otras 3 internas de Andalucía: cuencas mediterráneas andaluzas, cuencas del Tinto, Odiel y Piedras y del Guadalete-Barbate (Figura 1). Los organismos que gestionan el agua en las demarcaciones que incluyen más de una comunidad autónoma (intercomunitarias) son las respectivas confederaciones hidrográficas, organismos autónomos dependientes del Ministerio de transición ecológica y el reto demográfico (MITECO). En el caso de las demarcaciones cuyo territorio se encuentra íntegramente dentro de los límites de Andalucía el organismo competente en materia de agua es la Consejería de Agricultura, Pesca, Agua y Desarrollo Rural de la Junta de Andalucía (CAPAD) apoyada en la gestión de los recursos hídricos andaluces por la Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía.

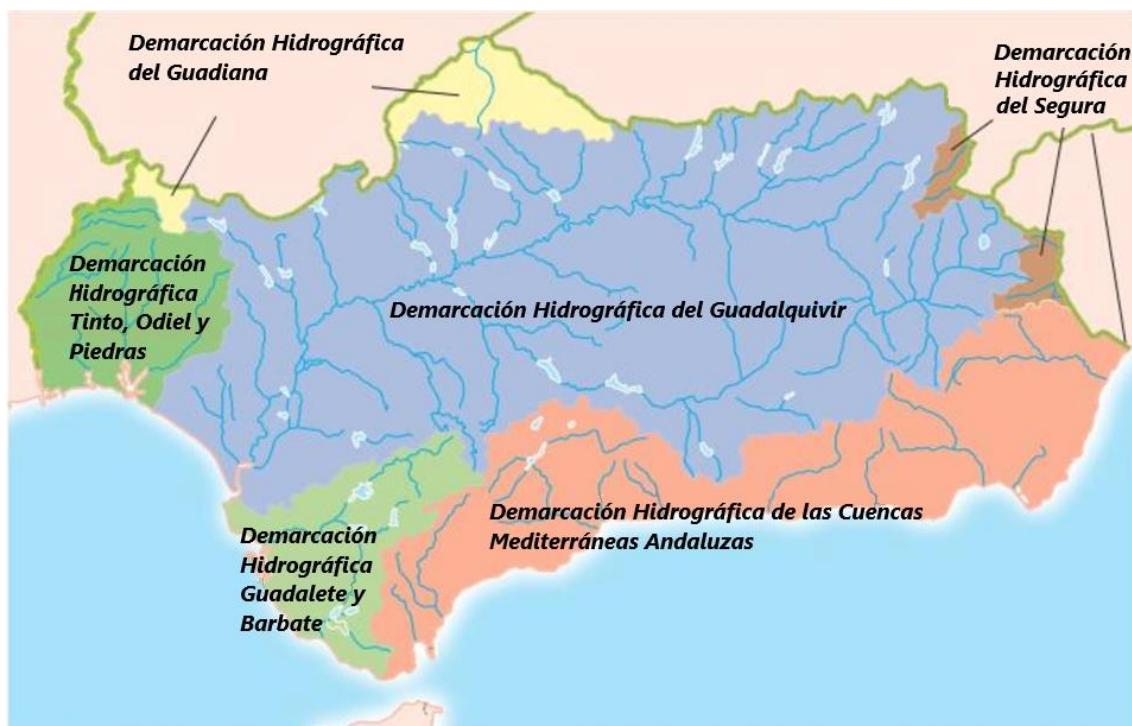


Figura 1. División administrativa de gestión del agua en Andalucía. Fuente: CAPADR.

2.1 La Consejería de Agricultura, Pesca, Agua y Desarrollo Rural

La Consejería de Agricultura, Pesca, Agua y Desarrollo Rural (CAPAD) es el organismo responsable de la planificación y gestión de los recursos hídricos en cada una de las demarcaciones hidrográficas intracomunitarias de acuerdo con los principios de la DMA. Sus funciones abarcan desde el conocimiento del estado de los recursos hídricos (disponibilidad y calidad), usos y demandas, infraestructuras hidráulicas, desarrollo e implementación de los planes hidrológicos de demarcación y de los correspondientes planes de gestión de inundaciones y de sequías. Así en épocas de escasez de agua, se aplican los Planes Especiales de Sequías donde se establece medidas específicas según el nivel de sequía o escasez, con el objetivo de garantizar el suministro de agua a la población y a las actividades económicas esenciales, como el regadío y preservar los ecosistemas acuáticos de los impactos derivados de la escasez de agua.

2.2 La Confederación Hidrográfica del Guadalquivir

De las tres cuencas intercomunitarias existentes en Andalucía, es la cuenca del Guadalquivir la de mayor relevancia al estar el 90% de su territorio en la comunidad andaluza, a diferencia de las cuencas del Guadiana (10%) y del Segura (9%). Ocupa el 60% del territorio de la comunidad autónoma y es la entidad de planificación hidrológica como mayor importancia del regadío pues concentra el 77% de la superficie de riego andaluza. Por estas razones, en este entregable se ha considerado como cuenca representativa del regadío andaluz.

Sus funciones son idénticas a las ya descritas para la CAPAD en Andalucía, pero aplicadas en la demarcación hidrográfica del Guadalquivir. En situaciones de escasez se aplica el correspondiente Plan Especial de Sequías.

3 Derechos de uso

La normativa que regula el uso de las aguas del dominio público hidráulico en España se encuentra principalmente en el TRLA y el Reglamento del Dominio Público Hidráulico (RDPH). Estos documentos clasifican los usos del dominio público hidráulico en usos comunes generales, usos comunes especiales y usos privativos. Los usos privativos son aquellos en los que se otorga un título jurídico a un particular o colectivo para que aproveche o utilice el dominio público hidráulico excluyendo de su uso a terceros, mientras dure el plazo por el que se le haya otorgado el derecho de aprovechamiento.

Para el uso privativo de las aguas del dominio público hidráulico, es necesaria una concesión o autorización administrativa, según lo establecido en el TRLA. Es el organismo de cuenca de cada demarcación hidrográfica (Confederaciones del Guadalquivir, Guadiana y Segura o bien la CAPAD para las cuencas internas de Andalucía) quien autoriza los usos privados del agua, y para obtener dicha autorización es necesario realizar el trámite de autorización o concesión. En función de si el volumen de agua a utilizar del dominio público hidráulico es inferior a los 7.000 m³/año y la captación tiene lugar en la misma finca donde se utiliza, se realiza el trámite de autorización. Si no tiene cabida dentro del proceso administrativo de autorización, el uso privativo de agua debe realizarse siguiendo el proceso administrativo de concesión administrativa.

3.1 Autorización administrativa

Cuando el volumen de agua captado es inferior a 7.000 m³/año y se utiliza dentro de la misma finca donde se obtiene, el propietario está obligado a solicitar un permiso de aprovechamiento. Este requisito también se aplica al uso de aguas pluviales. Si la captación se encuentra en una zona de policía (franja lateral de 100 m de ancho situada a cada lado del cauce) o en una masa de agua protegida, será necesario obtener una autorización administrativa previa.

3.2 Concesión administrativa

En cambio, si el volumen de agua supera los 7.000 m³/año o si la captación tiene lugar fuera del perímetro de la finca donde se destina el agua, será imprescindible tramitar una concesión.

En cuanto a las concesiones, es importante tener en cuenta que son de carácter temporal, es decir, su duración queda establecida en la resolución administrativa y está sujeta a renovación o extinción. Son transmisibles (previa autorización) y están sujetas a las condiciones establecidas en la propia resolución de la Agencia.

4 Plan especial de sequía de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir

Los planes de sequía son un instrumento de gestión elaborado por las administraciones hidráulicas con el objetivo de gestionar los recursos hídricos disponibles, prevenir y mitigar los efectos de las situaciones de sequía. En estos planes se establecen las líneas de actuación y se definen medidas a implementar en función de la gravedad de la situación.

Los planes especiales de sequía son específicos de cada demarcación hidrográfica, aunque todos ellos aplican metodologías semejantes para establecer los niveles de escasez y toma de medidas para minimizar los impactos de las sequías en el territorio andaluz.

El Plan Especial de Sequía (PES) en vigor, (<https://www.chguadalquivir.es/plan-de-sequia-vigente-guadalquivir>), aprobado en mayo de 2018, distingue entre situaciones de sequía prolongada (disminución de lluvia) y situaciones de escasez coyuntural (problemática temporal de atención de las demandas de agua socioeconómicas establecidas en una zona). En el análisis de situaciones de sequía prolongada se identifican situaciones sin sequía y con sequía que conllevan la relajación del régimen de caudales ambientales. Las situaciones de escasez coyuntural son las que conllevan medidas de gestión que afectarán a los usos del agua. Se definen 4 escenarios en orden creciente gravedad: normalidad, prealerta (escasez moderada), alerta (escasez severa) y emergencia (escasez grave). En el momento en que la demarcación entra en prealerta se activan los mecanismos de concienciación, ahorro y seguimiento. En situación de alerta se toman medidas de gestión (oferta y demanda), y de control y seguimiento recogidas en el art. 55 del TRLA. Finalmente, en situación de emergencia se intensifican las medidas tomadas en alerta y estudia la necesidad de tomar medidas excepcionales de las recogidas en el art. 58 del TRLA.

La aplicación del PES se basa en el seguimiento de las llamadas unidades territoriales de sequía prolongada, (UTS) y de escasez (UTE) (Figuras 2 y 3). Las 25 UTS son zonas homogéneas en cuanto a la disponibilidad de recursos (Figura 2). El territorio de la

demarcación se ha dividido en 23 UTE, definidas para atender las demandas de cada zona, estando directamente relacionadas con los sistemas de explotación considerados en el Plan Hidrológico de la Demarcación. En la Figura 3 se muestran en el mismo color las que pertenecen al sistema de explotación denominado Regulación General (70% de la cuenca). Las distintas UTS y UTE coinciden total o parcialmente en su ubicación territorial. La declaración de entrada y salida de cada uno de los escenarios de escasez (normalidad, prealerta, alerta y emergencia) en cualquiera de las UTE se realiza en función de los índices de estado de escasez para cada zona. Cuando sea necesario se declarará situación excepcional por sequía extraordinaria a partir del análisis conjunto del estado de las UTS y UTE.

La revisión del estado de sequía prolongada y de escasez coyuntural de las UTS y UTE respectivamente se realiza mensualmente, según los valores de los índices de estado.



Figura 2. Unidades de gestión de sequía prolongada, UTS, definidas en el PES del Guadalquivir. Fuente: Confederación hidrográfica del Guadalquivir.

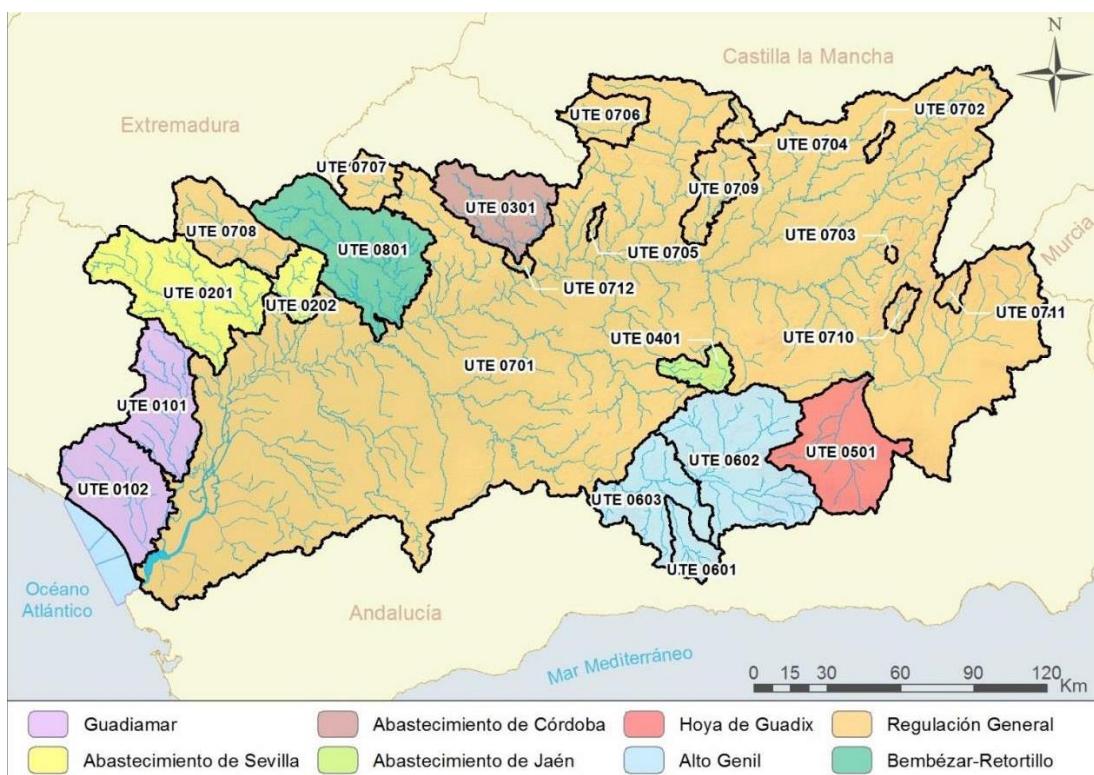


Figura 3. Unidades de gestión de escasez coyuntural definidas en el PES del Guadalquivir. Fuente: Confederación hidrográfica del Guadalquivir.

4.1 Indicadores de sequía prolongada y de escasez.

El cálculo del índice de estado de sequía prolongada (IESP) de cada UTS se basa en el análisis de las series históricas de precipitación mediante el SPI, indicador de precipitación estándar. Es un índice normalizado que toma valores próximos a cero en situación de normalidad, positivos cuando la precipitación en el periodo de estudio es superior a la media y negativos en caso contrario. La metodología completa de cálculo y su aplicación a cada una de las UTS de la demarcación se recoge en la sección 5.1 del PES.

El IESP de cada UTS será un valor entre 0 y 1, correspondiendo al valor 0.3 el valor del SPI que coincide con la imposibilidad de mantener los caudales ambientales mínimos fijados en el plan hidrológico de demarcación. En esas circunstancias es posible relajar tales valores mínimos.

El indicador de estado de escasez, (IEE), de cada UTE se obtiene a partir de la relación entre la disponibilidad de recursos y las demandas, identificando las situaciones de déficit coyuntural en cada una.

Para cada UTE se selecciona una variable o conjunto de variables más representativas de la evolución de la disponibilidad de recursos. Estas variables pueden ser: volúmenes embalsados, aportaciones de entrada a embalse, precipitación, etc., que se evalúan a escala mensual. La descripción completa del cálculo del IEE y de los umbrales de entrada en los distintos escenarios de escasez está disponible en la sección 5.2 del PES de la demarcación.

El IEE toma valores entre 0 y 1. Valores superiores a 0.5 indican que la UTE está en situación de normalidad, valores entre 0.5 y 0.3 estado de escasez moderada (prealerta), entre 0.3 y 0.15 escasez severa (alerta) e inferiores a 0.15 escasez grave (emergencia).

4.2 Planes de actuación en función de la gravedad de la escasez

A partir del momento en que una UTS entra en situación de sequía prolongada (IESP <0.3) y/o una UTE está fuera de la situación de normalidad (IEE <0.5) se activan las correspondientes medidas de actuación. Puede llegarse incluso a declarar una situación excepcional por sequía extraordinaria por parte del presidente del organismo de cuenca, cuando en una o varias UTE en alerta coincidan temporal y geográficamente con alguna UTS en situación de sequía prolongada, o bien que una o varias UTE en emergencia coincidan temporal y geográficamente con alguna UTS en situación de sequía prolongada. En esta ‘situación excepcional por sequía extraordinaria’ y para la zona afectada por la declaración, la Junta de Gobierno del organismo de cuenca valorará la necesidad y oportunidad de solicitar al Gobierno, a través del Ministerio que ejerza las competencias sobre el agua, la adopción de las medidas que sean precisas en relación con la utilización del dominio público hidráulico, conforme a lo previsto en el artículo 58 del TRLA.

La actuación del organismo de cuenca en situaciones de sequía prolongada y de escasez coyuntural viene definida por las condiciones de entrada y salida en cada situación (tabla 1).

Tabla 1. Condiciones de entrada y salida de los escenarios de escasez en función del valor del IEE. Fuente: Confederación hidrográfica del Guadalquivir

Situación	Entrada	Salida	Escenario de salida
Prealerta	$<0.5 - \geq 0.3$	>0.5	Normalidad
Alerta	2 meses consecutivos $<0.3 - \geq 0.15$	≥ 0.3	Prealerta
Emergencia	2 meses consecutivos (<0.15)	≥ 0.15	Alerta

Cada UTE tiene un plan de actuación específico para cada nivel de escasez. A modo de ejemplo se han elegido las UTE 0701 Regulación General (Tabla 2) y la UTE 0102 Madre de las Marismas (Tabla 3). En estas tablas se recogen medidas de actuación en el ámbito del regadío en distintos niveles de gravedad de la escasez. El nivel de concreción de las medidas varía considerablemente entre ambas UTE. La UTE Regulación General coincide en casi su totalidad con el sistema de explotación del mismo nombre, que es el más extenso de la cuenca y que concentra el 40% del regadío de la demarcación. Por su extensión territorial (cubre desde el nacimiento hasta la desembocadura del Guadalquivir) presenta una gran diversidad de cultivos y sistemas de manejo lo que dificulta el establecimiento de reducciones de las dotaciones de riego de forma generalizada para todo el territorio. Encontramos la situación opuesta en la UTE Madre de las Marismas, localizada en el tramo final del Guadalquivir, en el entorno de Doñana, de una extensión considerablemente inferior y con más homogeneidad de las explotaciones de regadío. En este caso sí hay recomendaciones específicas de reducciones de las dotaciones de riego para los distintos niveles de gravedad de las situaciones de escasez coyuntural.

Los planes de actuación de las UTE de la demarcación deben de servir de guía a las comunidades de regantes (CCRR) localizadas en cada una de ellas, para trasladar a escala de comunidad de regantes (CR) las medidas del PES para establecer criterios de reparto de la dotación de agua en situaciones de escasez. A partir de ahí cada CR podrá establecer medidas más o menos exigentes a las propuestas en el plan de actuación de su UTE en función de sus circunstancias particulares.

Tabla 2. Medidas a adoptar en los diferentes escenarios de escasez coyuntural en la UTE 0701. Fuente: Confederación Hidrográfica del Guadalquivir

UTE 0701- Regulación General			
Estado	Medidas a adoptar	Momento de activación	Autoridad competente
Prealerta	Inventario, actualización y mantenimiento de las infraestructuras específicas para afrontar la escasez coyuntural. Inspección y adecuación de las tomas de aguas subterráneas existentes.	Cualquier mes	Confederación Hidrográfica del Guadalquivir
	Recomendación al Servicio de Explotación para que valore la oportunidad de aconsejar cultivos que requieran menos dotaciones	De marzo a octubre	Confederación Hidrográfica del Guadalquivir
Alerta	Solicitar a la Comisaría de aguas y al Servicio de Explotación que mantenga especial vigilancia a detacciones de caudal para riegos.	De abril a septiembre	Confederación Hidrográfica del Guadalquivir
	Se valorará la oportunidad de reducir dotaciones de riegos no regulados y subterráneos con objeto de mantener una reserva de agua subterránea estratégica para su posible movilización en caso necesario.	De abril a septiembre	Confederación Hidrográfica del Guadalquivir
Emergencia	Restricción de riegos conforme a los desembalses propuestos, salvo casos excepcionales	De abril a septiembre	Confederación Hidrográfica del Guadalquivir
	Solicitar a la Comisaría de aguas y al Servicio de Explotación que mantenga especial vigilancia a detacciones de caudal para riegos.	De abril a septiembre	Confederación Hidrográfica del Guadalquivir
	Se valorará la oportunidad de reducir dotaciones de riegos no regulados y subterráneos con objeto de mantener una reserva de agua subterránea estratégica para su posible movilización en caso necesario	De abril a septiembre	Confederación Hidrográfica del Guadalquivir

	Reserva de 100 hm ³ para situaciones de emergencia, con el objetivo de evitar una pérdida permanente de cultivo para aquellos cultivos vulnerables.	Cualquier mes	Confederación Hidrográfica del Guadalquivir
--	--	---------------	---

Tabla 3. Medidas a adoptar en los diferentes escenarios de escasez coyuntural en la UTE 0102. Fuente: Confederación Hidrográfica del Guadalquivir

UTE 0102- Madre de las Marismas			
Estado	Medidas a adoptar	Momento de activación	Autoridad competente
Prealerta	Reducción progresiva del volumen de riego en función del valor del indicador de estado hasta un máximo de 25% del total. Este porcentaje estará sujeto a lo que establezcan los estudios hidrológicos e hidrogeológicos realizados por la CHG y el IGME de acuerdo con el convenio vigente o futuros desarrollos del mismo.	Cualquier mes	Confederación Hidrográfica del Guadalquivir
Alerta	Reducción progresiva del volumen de riego en función del valor del indicador de estado hasta un máximo de 25% y el 50% del total. Este porcentaje estará sujeto a lo que establezcan los estudios hidrológicos e hidrogeológicos realizados por la CHG y el IGME de acuerdo con el convenio vigente o futuros desarrollos del mismo.	Cualquier mes	Confederación Hidrográfica del Guadalquivir
	Solicitar a la Comisaría de aguas y al Servicio de Explotación que mantenga especial vigilancia a detacciones de caudal para riegos.	Cualquier mes	Confederación Hidrográfica del Guadalquivir
Emergencia	Reducción progresiva del volumen de riego en función del valor del indicador de estado de al menos el 50% del total. Este porcentaje estará sujeto a lo que establezcan los estudios hidrológicos e hidrogeológicos	Cualquier mes	Confederación Hidrográfica del Guadalquivir

	realizados por la CHG y el IGME de acuerdo con el convenio vigente o futuros desarrollos del mismo.		
	Solicitar a la Comisaría de aguas y al Servicio de Explotación que mantenga especial vigilancia a detacciones de caudal para riegos.	Cualquier mes	Confederación Hidrográfica del Guadalquivir
	Suspensión de riegos desde los acuíferos cuando existan indicios de impactos severos en situaciones irreversibles.	Cualquier mes	Confederación Hidrográfica del Guadalquivir

La información pública sobre los estados de sequía, en la demarcación del Guadalquivir, es accesible desde la sección de política de gestión de sequías de la web del organismo (<https://www.chguadalquivir.es/politica-de-gestion-de-sequias>), que proporciona informes sobre estados de escasez y de sequía actuales, así como mapas interactivos con el estado de las distintas UTS y UTE. Esta información se complementa con la que proporciona el boletín hidrológico peninsular del MITECO, con información actualizada semanalmente del estado y evolución de los recursos hídricos (niveles de los embalses, precipitación, caudales medios entre otras variables) de cada demarcación del país mediante un dashboard¹ (<https://www.arcgis.com/apps/dashboards/912dfee767264e3884f7aea8eb1e0673>). Este tipo de herramientas garantiza la transparencia y el acceso a información actualizada sobre la gestión del agua en períodos de escasez.

¹ Un dashboard es una herramienta digital que presenta datos complejos de forma visual y resumida para monitorear métricas e indicadores clave de desempeño para facilitar la toma de decisiones en tiempo real.

4.3 Cesión de derechos

En situaciones de escasez, es posible aplicar la cesión temporal de derechos entre usuarios del agua, instrumento jurídico recogido en el TRLA en su art. 67, como medida complementaria a las regidos en los PES.

Así en la demarcación hidrográfica del Guadalquivir es habitual la aplicación de la Cesión de Derechos de Riego entre comunidades de regantes, instrumento jurídico regulado por el organismo de cuenca para optimizar el uso del agua en episodios de escasez.

Los contratos de cesión de derechos son voluntarios, se formalizan por escrito y deben ser notificados a la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, quien autoriza su puesta en marcha y vela por su transparencia. Ejemplo de ello son el centenar de contratos autorizados por la Confederación en el año 2023 <https://www.chguadalquivir.es/-/la-chg-autoriza-un-centenar-de-contratos-de-cesion-de-derechos-de-riego-en-la-cuenca-del-guadalquivir-con-un-volumen-cercano-a-los-30-hm3-de-agua>; o en el año 2024 el contrato firmado entre las CCRR de Genil Margen Izquierda y Valle Inferior (https://valleinferior.es/la-confederacion-autoriza-el-contrato-de-cesion-de-derechos-firmado-por-segundo-ano-consecutivo-con-la-comunidad-del-genil-margen-izquierda_aa959.html).

5 Estrategias para mejorar la eficiencia del uso del agua en episodios de sequía

La eficiencia del uso del agua está condicionada tanto por las infraestructuras e instalaciones necesarias para su transporte, distribución y aplicación, el manejo que se haga de las mismas y por aspectos propiamente agronómicos. Además, es conveniente clasificar las estrategias de mejora de la eficiencia en función de su escala de aplicación: CR o explotación.

A continuación, se describen diversas estrategias de mejora de la eficiencia en el uso del agua a escalas de CR y parcela, y clasificadas según afecten a las infraestructuras e instalaciones hidráulicas y gestión o tengan que ver con aspectos agronómicos.

5.1 Estrategias de mejora de la eficiencia del uso de agua a escala de CCRR

La mejora de la eficiencia del uso de agua a escala de CR incluye tanto la actuación sobre las infraestructuras hidráulicas, gestión y mejora de estas y la actuación sobre aspectos agronómicos.

5.1.1 Instalaciones hidráulicas

Las principales actuaciones sobre las instalaciones hidráulicas son:

- a) Modernización del sistema del sistema de distribución de agua. La transformación de sistemas abiertos de transporte y distribución de agua en redes a presión, aunque su funcionamiento implica costes energéticos, es una actuación que mejora la eficiencia en el transporte y distribución del agua a escala de CR, adquiriendo especial relevancia en situaciones de escasez.
- b) Sistemas de almacenamiento. Siempre que sea posible (disponibilidad de espacio y las autorizaciones administrativas correspondientes) es recomendable disponer de balsas de almacenamiento para minimizar la reducción de dotaciones en situaciones de escasez.

5.1.2 Manejo de instalaciones las instalaciones de hidráulicas

Se presentan a continuación algunas de las posibles actuaciones relativas al manejo de las instalaciones:

- a) Mantenimiento del sistema hidráulico: Inspecciones de las instalaciones de la CR, detección y reparación de fugas, sustitución de equipos de bombeo con funcionamiento ineficiente, etc... El mantenimiento adecuado minimiza las pérdidas de agua en momentos de escasez.
- b) Optimización de la operación de las estaciones de bombeo. Regulación de las estaciones de bombeo ajustada al rango de caudales y presiones del sistema para evitar el consumo innecesario de energía, optimizando el buen funcionamiento del sistema y su durabilidad.
- c) Modificación de la gestión ordinaria de las instalaciones. En la cuenca del Guadalquivir existen CCRR cuyo sistema de distribución mixto, abierto (canales) desde el punto de captación hasta la/s estación/es de bombeo y desde allí hasta los hidrantes mediante redes presurizadas. El manejo de este tipo de instalaciones es complejo y requiere de unos caudales mínimos circulantes en el canal, por ello en situaciones de escasez, se cancela temporalmente el riego a la demanda y se concentra la demanda en turnos de riego asociados a los periodos en los que el canal va a transportar un caudal adecuado, repartiéndose la dotación disponible en tales periodos.

5.1.3 Aspectos agronómicos

La frecuencia de periodos de escasez en cuencas mediterráneas como la del Guadalquivir, hace conveniente que las CCRR hagan recomendaciones sobre las posibles especies o variedades a cultivar, tanto de cultivos anuales como permanentes, que sean más eficientes en el uso del agua y proporcionen producciones rentables, para adaptarse mejor a las situaciones de escasez y minimizar pérdidas económicas.

5.2 Estrategias de mejora de la eficiencia del uso de agua a escala de finca

A escala de parcela es posible mejorar la eficiencia del uso de agua con actuaciones sobre la instalación de riego, su manejo y aspectos agronómicos.

5.2.1 Instalaciones de riego

a) Transformación a sistemas de riego eficiente. La elección del sistema de riego y su diseño es uno de los factores que más determinan la sostenibilidad y la eficiencia o rendimiento en el uso del agua, ya que esta elección condiciona la uniformidad de la distribución del agua, la reducción de pérdidas y la adaptación a las necesidades específicas de los cultivos y del suelo. Un buen diseño del sistema de riego asegura que el agua se distribuya de manera uniforme en toda la parcela, lo que es esencial para el crecimiento homogéneo de los cultivos y el aumento de la producción. Por otra parte, un buen manejo del riego reduce o evita las pérdidas de agua por escorrentía, filtración profunda o por evaporación y deriva llegando a aproximarse la lámina total aplicada o lámina bruta a la lámina que corresponde a las necesidades o lámina neta o requerida. Para el caso que se cumplan los requisitos de riego, es decir satisfacer la lámina requerida en todos los puntos, una buena uniformidad permite alcanzar un buen rendimiento de aplicación, esto puede verse en la figura 4.

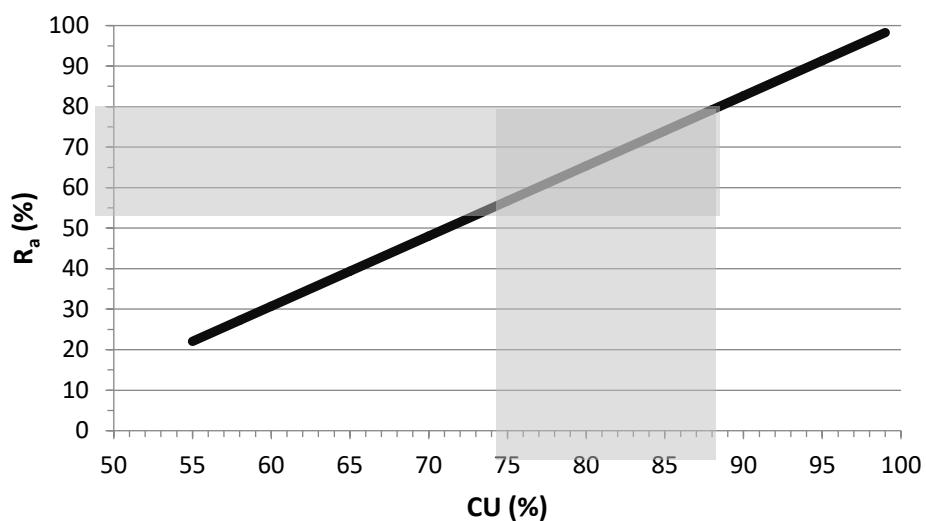


Figura 4. Relación entre rendimiento de aplicación y uniformidad del riego

Por tanto, con el buen diseño del riego podrá conseguirse un buen rendimiento de aplicación

Sistemas como el riego por goteo permiten una aplicación precisa del agua directamente en la zona radicular de las plantas, minimizando las pérdidas.

Por otro lado, cada cultivo y tipo de suelo tiene diferentes requerimientos de agua. Un sistema de riego bien diseñado puede ajustarse para satisfacer estas necesidades específicas (dosis de riego e intervalos entre ellos), optimizando el uso del agua y mejorando la salud y productividad de los cultivos. La elección del sistema de riego en la explotación es un elemento básico para reducir los volúmenes de agua en la explotación.

Riego localizado

Esta técnica consiste en aplicar agua directamente en la zona radicular de las plantas a través de emisores o goteros, lo que minimiza las pérdidas por evaporación y escorrentía. Este es un sistema de riego en el que los emisores se encuentran distribuidos a lo largo de los ramales, ya sea montados sobre la tubería o integrados en ella. Los goteros están diseñados para que se reduzca drásticamente la presión del interior de la tubería y se libere el agua, gota a gota, sobre un punto concreto de la parcela. Esta aplicación precisa del riego no solo optimiza el uso del agua, sino que también permite la aplicación conjunta de nutrientes, lo que mejora la eficiencia de la fertilización. Aunque la inversión inicial puede ser elevada y requiere un mantenimiento regular para evitar obstrucciones en los goteros, los beneficios a largo plazo, tanto económicos como ambientales, son considerables.

Aspersión

El riego por aspersión es un método de riego que simula la lluvia, distribuyendo el agua a través de aspersores. Esta técnica permite cubrir grandes extensiones de terreno de manera uniforme, adaptándose a diversos tipos de cultivos y terrenos, incluso aquellos con topografías irregulares.

En este sistema de riego, el agua es conducida a presión hasta los emisores, los cuales la distribuyen a través del aire en forma de lluvia sobre toda la superficie de la parcela, generando un conjunto de superficies mojadas que se solapan entre sí. Los dispositivos emisores que se pueden utilizar son los aspersores o los deflectores, que trabajan a presiones elevadas y generan un chorro de agua pulverizada en gotas. La intensidad y la distribución del agua pueden ser ajustadas según las necesidades del cultivo y las condiciones climáticas, permitiendo una aplicación precisa y controlada.

Los sistemas de aspersión pueden ser estacionarios, donde los aspersores permanecen fijos, y sistemas de desplazamiento continuo, donde los aspersores se mueven automáticamente a través del campo mediante máquinas de riego.

A pesar de sus ventajas, el riego por aspersión presenta algunos inconvenientes. Las pérdidas de agua por evaporación y deriva del viento son factores para tener en cuenta, especialmente en climas cálidos y ventosos. Además, el consumo de energía para la presión del agua puede ser elevado, incrementando los costos operativos. Por lo tanto, es importante seleccionar los aspersores adecuados y ajustar la presión del agua para minimizar estas pérdidas.

- b) Mantenimiento del sistema de riego: Inspecciones del sistema de riego, reparación de fugas y obstrucciones, y calibración de aspersores y goteros garantizan una distribución uniforme del agua. Válvulas de control de presión y reguladores de caudal optimizan aún más la eficiencia.
- c) Almacenamiento y reutilización de agua: La construcción de balsas/depósitos para almacenar agua, para afrontar la sequía estacional. En invernaderos se pueden construir sistemas de reutilización de agua de drenaje.
- d) Ajuste del flujo del agua y la presión de trabajo en el bombeo del pozo: La correcta selección de la bomba sumergible en función del caudal deseado y la presión del bombeo, junto con la instalación de sistemas de regulación y el mantenimiento periódico del sistema evitan el consumo innecesario de energía, optimizando el buen funcionamiento del sistema y su durabilidad.

5.2.2 Manejo del riego

Para desarrollar estrategias de uso eficiente del agua de riego, como el riego deficitario, es preciso conocer la cantidad de agua que se puede reducir sin disminuir el rendimiento y calidad de los cultivos. Esto depende, entre otros factores, de las etapas de crecimiento de la planta.

Para utilizar estas técnicas, es imprescindible conocer los períodos más y menos sensibles al déficit hídrico del cultivo en cuestión y su impacto sobre la producción final y su calidad. Hoy en día, estas etapas más sensibles al déficit hídrico se conocen para la mayoría de los cultivos. Se aplica principalmente en cultivos leñosos, aunque sería posible aplicarlo a cultivos como el maíz, que es muy sensible cuando llega a floración y durante las primeras etapas de cuajado del grano. Como apoyo a la implementación de riegos deficitarios, se puede consultar el documento de la FAO sobre la variación del rendimiento de los cultivos en función del agua disponible como introducción a esta temática (<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/82bd842b-862d-4e51-8794-d80156ddab2e/content>).

Hay distintas técnicas de riego deficitario:

- a) Riego deficitario controlado: consiste en reducir las dosis de agua sólo en aquellas etapas del cultivo menos sensibles a la falta de agua, sin comprometer el rendimiento (tanto en cantidad como en calidad) es decir, sin poner en peligro la viabilidad de la explotación.
- b) Riego deficitario estacionalmente sostenido: se basa en una reducción proporcional al consumo óptimo de agua del cultivo repartido de forma invariable a lo largo de la temporada de riego.
- c) Riego con secado parcial de la zona radicular se basa en alternar las zonas de suelo mojado. Mientras una parte de las raíces están en la zona húmeda, la otra parte permanece en la parte seca. Cada 2-3 semanas se alterna la zona húmeda por la seca.

Las técnicas de riego deficitario pueden ser muy interesantes y dar buen resultado en muchos casos. Pero su eficacia va a depender del sistema de riego, del tipo de suelo y de la adaptabilidad del cultivo.

5.2.3 Aspectos agronómicos

A escala de parcela las principales actuaciones de tipo agronómico encaminadas a mejorar la eficiencia del uso del agua de riego son:

- a) Manejo del suelo: La mejora de la capacidad de retención de agua del suelo mediante la incorporación materia orgánica (compost y estiércol), laboreo mínimo facilitan la infiltración del agua y aumentan la capacidad de retención de ésta en el suelo. El uso de coberturas vegetales y acolchados ayuda a reducir tanto la evaporación directa del agua del suelo como la erosión y formación de costras superficiales, facilitando la infiltración.
- b) Selección de cultivos y variedades: Escoger especies o variedades que requieren menos agua o de ciclos de cultivo más cortos puede contribuir a es una estrategia reducir la presión sobre los recursos hídricos.
- c) Optimización del calendario de siembra y cosecha: Ajustar las fechas de siembra en función de las previsiones meteorológicas, así como los ciclos vegetativos de las especies y poder evitar las fases críticas al déficit hídrico del cultivo durante las épocas más secas y cálidas.

Estas acciones, aunque a menudo consideradas complementarias, desempeñan un papel clave en el desarrollo de sistemas agrarios más eficientes y resilientes frente a la escasez de recursos hídricos.

6 Estrategias digitales para afrontar con más eficacia los episodios de sequía

La eficacia de las medidas sobre las infraestructuras hidráulicas y agronómicas descritas en el apartado anterior implementadas a escala de CR y/o de finca puede mejorarse con actuaciones basadas en herramientas digitales.

Para afrontar una situación de menor disponibilidad de agua en un colectivo como una CR es necesario tomar decisiones eficaces, con transparencia y determinación y posterior verificación que conlleven una cohesión entre el colectivo de afectados.

Primero es necesario tener un conocimiento profundo del conjunto de la comunidad, tanto de las características edáficas, como de la infraestructura de regadío, así como disponer de un sistema de comunicación ágil, rápido y eficiente entre los responsables técnicos de la comunidad y los regantes.

No disponer del agua necesaria comporta implementar restricciones respecto a la situación de normalidad para que los cultivos que se siembren puedan llegar a la cosecha. A la vez, las estrategias que se implementen pueden ser muy diferentes en función de las infraestructuras de transporte y distribución del agua que disponga la comunidad y su eficiencia.

La finalidad de las actuaciones descritas en el apartado anterior es minimizar el impacto de la reducción de dotaciones en la producción y por tanto la renta de los agricultores. La eficacia de tales actuaciones puede mejorarse con el uso de herramientas digitales con el apoyo de los técnicos de la CR.

A continuación, se describen diversas actuaciones en las que se aplicarán diversas tecnologías digitales analizadas en la actividad 2.5 del proyecto Smart Green Water *Desarrollo conjunto de un método de caracterización de las soluciones disponibles en el mercado*, y de sus correspondientes entregables, en particular el 2.5.3 de *Recomendaciones a los usuarios para la elección de la herramienta más adecuada de las disponibles en el mercado*. Se hará hincapié en cómo utilizar las distintas herramientas digitales para reducir el uso del agua en situaciones de escasez.

6.1 Inventario de cultivos sobre sistemas de información geográfica y teledetección

Las comunidades de regantes en situaciones de normalidad suelen disponer de la distribución anual de parcelas regadas y cultivos implantados o que se deseen implantar. Si dicho inventario se almacena cada campaña de riego sobre un sistema de información geográfica, (base de datos georreferenciadas que se visualiza en forma de mapas), se facilita considerablemente la identificación de las parcelas con cultivos permanentes (leñosos) y con cultivos de implantación anual (herbáceos). Esta diferenciación es importante a la hora de aplicar las medidas prescritas de los PES en la UTE en la que se ubique la comunidad (tablas 2 y 3).

La CR puede verificar el inventario anual de cultivos bien mediante visitas de campo complementadas mediante vuelos de dron en los momentos clave de la campaña.

Con esta información los técnicos de la CR pueden diseñar un reparto del agua, a partir de los siguientes criterios:

- a) Reducciones específicas establecidas en el PES en la UTE de la CR (tabla 3).
- b) Prioridad a la supervivencia de los cultivos leñosos plurianuales, tal como determina la ley de aguas (estimada en un 35 % de las necesidades productivas) cuando las medidas a adoptar en los diferentes escenarios de escasez coyuntural de UTE no lo especifiquen (tabla 2).
- c) Cuantificación de la superficie con cultivos de regadío y determinación del volumen por unidad de superficie de posible reparto después de tener en cuenta la eficiencia del transporte y distribución del agua en las infraestructuras comunales.

Posteriormente, la CR debe dar una respuesta individualizada a cada regante que ha declarado las parcelas que gestiona, cuáles desea regar y qué cultivos desea sembrar, si con el reparto de agua realizado puede regar toda la superficie declarada satisfaciendo necesidades anuales de los cultivos que desea sembrar tiene suficiente agua para el

cultivo genere una producción que le permita recuperar, como mínimo, los costes de producción.

Si a criterio de la Comunidad esto no es posible, se debe limitar la superficie y las parcelas que el agricultor puede regar, para evitar conflictos y disputas por el agua en medio de la campaña de riego.

En caso de cultivos permanente el agricultor deberá aplicar riegos deficitarios.

6.2 Instrumentos digitales de manejo, seguimiento y control del riego en situación de sequía

A continuación, se describen herramientas digitales que permiten, desde la estimación de las necesidades de los cultivos a partir de datos climáticos, hasta sistemas soporte a la decisión de última generación para el manejo del riego en condiciones de escasez.

6.2.1 Estimación de las necesidades de agua de riego a partir del cálculo de la evapotranspiración del cultivo y programación del riego

En Andalucía, tanto los técnicos de las CCRR como los agricultores a título individual pueden acceder a información agrometeorológica pública que proporciona la Red de Información Agroclimática de Andalucía (RIA), compuesta por estaciones meteorológicas que forman parte del Sistema de Información Agroclimática para el Regadío, (SIAR) dependiente del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, distribuidas por el territorio y ubicadas en las zonas de riego (<https://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/riaweb/web/>). En estas estaciones se calcula la Evapotranspiración de referencia (ET₀) dato fundamental para determinar las necesidades hídricas de los cultivos. Estos datos son abiertos y puede accederse a ellos mediante distintas aplicaciones de programación de riego, ya sean públicas o comerciales.

Es posible acceder a recomendaciones de riego semanales de diversos cultivos a través de la plataforma SERVIFAPA, así como aplicaciones específicas para la programación del riego de cultivos olivar, almendro, frutos rojos, entre otros, determinada a partir de

las características de cada explotación, tales como estación meteorológica de referencia, datos de los cultivos, características del sistema de riego y del suelo, volumen de agua disponible,

(https://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/servifapa/busador?sort_by=field_fecha_publicacion&f%5B0%5D=ambito%3ARiego&fulltext=). En caso de que la explotación tuviera estación meteorológica propia, podrían utilizarse estos datos en vez de los de la estación pública más cercana.

El SIAR, permite el cálculo de las necesidades netas de riego de un conjunto amplio de cultivos en función sólo de la ubicación geográfica y del cultivo (<https://servicio.mapa.gob.es/websiar/NecesidadesHidricas.aspx>).

Existen aplicaciones gratuitas para la programación de riegos y fertirriegos de precisión desarrolladas en distintos grupos operativos de ámbito andaluz. La aplicación web TIC4BIO, (<https://tic4bio.es/>), permite distintas opciones de programación de riegos de precisión del olivar, para explotaciones con distinto grado de digitalización. Para el fertiriego de precisión en olivar con aguas regeneradas, está disponible la aplicación REUTIVAR para dispositivos móviles (<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.rafacode.reutivarapp&hl=es>).

La utilidad de las herramientas descritas en situaciones de escasez es facilitar a los técnicos de las CCRR la publicación de recomendaciones de riego informadas para sus comuneros. Estas recomendaciones se basarán en la evolución de las variables climáticas (por ejemplo, la temperatura), la disponibilidad de agua (dotaciones reducidas) y la distribución de cultivos, contemplando incluso la aplicación de riegos deficitarios para distribuir óptimamente el agua disponible minimizando pérdidas de cosecha.

6.2.2 Uso de sensores de apoyo a las decisiones de riego

Existe una amplia gama de sistemas de monitorización de las variables que afectan a las necesidades de agua (climáticos, de suelo y de planta). Estos sistemas están formados por sensores con comunicación tipo Internet de las cosas (IoT), lo que permite el acceso a los valores registrados a partir de cualquier dispositivo con comunicación a Internet.

A parte de los sensores climáticos (estaciones meteorológicas), cuya utilidad ya se ha descrito en el apartado anterior que proporcionan datos clave para el cálculo de necesidades de los cultivos, se está generalizado el uso de sensores de monitorización del contenido de humedad del suelo en tiempo real, que permiten realizar ajustes precisos en el riego para evitar el exceso o la falta de agua. A partir de las lecturas automatizadas de estos sensores, visualizables en forma gráfica, es posible mantener el agua del suelo a disposición de las raíces del cultivo entre unos límites que permitan reducir drásticamente las pérdidas de agua (drenaje, escorrentía, evaporación) y con ello, aumentar la eficiencia del uso de agua en situaciones de escasez y minimizar las pérdidas de producción. Estos límites, entre la capacidad de campo y un porcentaje de la fracción de agotamiento de agua del suelo, dependen principalmente del cada tipo de cultivo, del estadio de desarrollo del cultivo, y de las características del suelo.

Otra opción es utilizar sensores de planta (sonda de potencial hídrico, dendrómetros) para el seguimiento del estado hídrico del cultivo y ajustar así la programación del riego.

Así la aplicación web citada en el apartado anterior TIC4BIO tiene la opción de realizar la programación del riego utilizando el contenido de humedad del suelo registrado por el correspondiente sensor para estimar el déficit de humedad del suelo, valor necesario para determinar las necesidades de riego mediante balance hídrico.

El uso de sensores a escala de finca permite ajustar las recomendaciones de riego generales propuestas por los técnicos de la CCRR a las condiciones particulares de cada explotación, mejorando así la eficiencia del uso de agua de riego.

Evidentemente que estos sistemas de programación de riegos se adecuan más a sistemas de riego a presión (aspersión, goteo, microaspersión) que al riego la superficie, puesto que permite restituir el agua consumida por el cultivo con una alta frecuencia y por consiguiente evitar las pérdidas habituales de agua que suelen suceder en el riego por superficie.

Existen diversas empresas que ofrecen asesoramiento para el uso de sensores a las explotaciones agrarias que están en digiMAPA, buscador web de empresas y tecnologías

"agrotech" para el sector agroalimentario del Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación (<https://digimap.akisplataforma.es/>).

Es conveniente tener en cuenta las limitaciones del uso de sensores como herramienta única de programación del riego, ya que normalmente se ubican en un único punto de la explotación, lo que impide tener en cuenta la variabilidad de suelo y desarrollo de cultivo en zonas distintas de la explotación. Aportan información sobre la evolución temporal de las variables, por ejemplo, variación del contenido de humedad del suelo después de un riego, sobre contenido de humedad a distintas profundidades para identificar si hay percolación, ayudando así al ajuste de las recomendaciones de riego generales.

6.2.3 Teledetección: Satélites y drones

La teledetección es una herramienta que permite obtener información sobre objetos situados en la superficie terrestre sin necesidad de contacto físico directo. Esto se hace mediante la detección y el registro de la energía que los objetos reflejan o emiten, utilizando sensores especializados. La teledetección puede ser pasiva o activa en función de si la captación de la radiación es natural (luz visible o las bandas del infrarrojo reflejado y térmico) o es emitida por el sensor y posteriormente reflejada por los objetos (radar, laser).

La aplicación de la teledetección permite determinar con elevada precisión qué cultivo está implantado en cada parcela, y si se está regando. Es posible estimar la evapotranspiración real de los cultivos a partir de la temperatura de la superficie terrestre obtenida del análisis de imágenes que miden la radiación infrarroja térmica y determinar sus necesidades de riego. En el caso de CCRR permite estimar con cierta precisión el agua evapotranspirada en el territorio de la CR y realizar un seguimiento automatizado y periódico de superficies de riego, superficies de cultivos y consumos totales de agua, facilitando así la gestión de los recursos hídricos de la CR en situaciones de escasez. Se trata de una herramienta que puede utilizarse para realizar inventarios de cultivos (sección 6.1)

Están disponibles distintas plataformas de tratamiento de imágenes satelitales gratuitas tales como Sentinel Hub (<https://www.sentinel-hub.com/>) y Google earth engine (<https://earthengine.google.com/>).

Los drones proporcionan información semejante a la de los satélites con mucha mayor resolución espacial (del orden de cm), pero con mayor coste (realización del vuelo y tratamiento de las imágenes) al no estar disponible esta información en plataformas abiertas.

6.2.4 Sistemas de medida y control del riego: contadores y manómetros

digitales

Para maximizar la eficiencia del uso de agua de riego es necesario, además de ajustar la dosis de agua a aplicar, controlar el sistema hidráulico de distribución de agua de la CR, para evitar pérdidas de agua (no productiva) al detectar la ocurrencia de roturas y fugas en el mismo, especialmente en épocas de escasez y gestionar las operaciones del sistema (ordinarias y extraordinarias) para que interfieran mínimamente con el riego de las distintas explotaciones de la CR.

El uso de sensores de presión con conexión IoT en los puntos claves del sistema hidráulico (estaciones de bombeo, tuberías principales, hidrantes) facilita la detección temprana de averías y fugas (ocurrencia y localización) y por tanto reducción de las pérdidas de agua. La disminución repentina de la presión en los puntos de muestreo respecto a los valores habituales es un indicador de ocurrencia de fugas/averías. Se pueden configurar sistemas de alerta en móviles y ordenadores de las variaciones de presión en las plataformas de comunicación IoT que avisen a los técnicos de las CCRR de posibles fallos en su sistema hidráulico.

La incorporación de los contadores digitales tanto a escala de CR (por ejemplo, en la salida de las estaciones de bombeo) como de explotación (en hidrante), permiten una medición precisa del agua aplicada al riego y el tiempo real del consumo de agua, facilitando también la detección temprana de fugas (por fallo del sistema o conexiones no autorizadas a la red de la CR) con el consiguiente ahorro de agua. Además, la

instalación de sistemas de control volumétrico conectados a plataformas digitales permite un seguimiento detallado del consumo de agua, lo que resulta fundamental para mejorar la transparencia y la trazabilidad en la gestión del riego.

Mediante la implementación de tecnologías avanzadas, como sensores de caudal, telemetría y análisis de datos en tiempo real, los agricultores pueden monitorizar con precisión el agua utilizada en sus cultivos. Esto no solo permite un ajuste dinámico del riego en función de las necesidades específicas de cada parcela, sino que también contribuye a evitar el desperdicio de agua y optimizar los costes de producción, gracias al control de la instalación de riego.

6.2.5 Sistemas avanzados de gestión del riego: Sistemas predictivos y Gemelos digitales

La información histórica registrados por sensores tanto locales (en el sistema atmósfera-suelo-planta y en las instalaciones hidráulicas), como remotos permite alimentar sistemas predictivos basados en algoritmos de inteligencia artificial como las redes neuronales con diferentes niveles de complejidad. Estos algoritmos pueden estimar con errores de predicción del orden del 2%, la demanda de agua a escala de CR en los próximos 7 días a partir de la distribución de cultivos, registros de contadores de hidrantes, temperatura. Esta información permite optimizar la gestión tanto del recurso agua en condiciones de escasez, como de la energía necesaria para el funcionamiento de los sistemas de riego a presión, con el consiguiente ajuste de los costes del riego y su repercusión en la rentabilidad de las explotaciones.

En CCRR con un alto nivel de digitalización sería posible implementar sistemas soporte a la decisión de última generación como los gemelos digitales, que integran las distintas herramientas descritas anteriormente (desde sensores IoT, teledetección, modelización hidráulica, sistemas predictivos). Un gemelo digital de una CR es una réplica virtual del sistema de distribución de agua desde el punto de captación (estaciones de bombeo, tomas del río) a los hidrantes en parcela, que está conectada con el sistema real a través de una red de sensores (caudalímetros y sensores de presión) en tiempo real. El operador del sistema puede simular el comportamiento de la red de la comunidad, considerando las características reales de la misma proporcionadas por los sensores,

ante múltiples escenarios de funcionamiento, por ejemplo, reducciones variables de la dotación de agua según el cultivo o grupo de cultivos asociados a cada hidrante, turnos de riego en situaciones de escasez.

7 Propuestas de mejora

Las CCRR deben estar preparadas para afrontar adecuadamente las frecuentes situaciones de escasez en las cuencas mediterráneas, especialmente aquellas que gestionan amplias superficies con diversos cultivos. Para ello es conveniente que desarrollen protocolos o planes de actuación en situaciones de escasez, semejantes a los planes de emergencia de las poblaciones de más de 20000 habitantes. Estos protocolos deben incluir como mínimo las actuaciones recogidas en los PES al uso del agua de riego para cada uno de los niveles de gravedad de la escasez en la zona donde se encuentre la CR, la correspondiente UTE en el caso de la demarcación del Guadalquivir. Como la especificidad en las restricciones varía según la UTE, cada CR, a partir del conocimiento profundo de sus instalaciones, gestión (a la demanda o por turnos) y distribución de cultivos, deberá definir de forma concreta las restricciones de la dotación disponible para cada nivel de gravedad de la escasez. Así mismo, podrían definir criterios de reparto en situaciones de escasez en el que se tengan en cuenta las estrategias de mejora de la eficiencia en el uso del agua implementadas a escala de CR y de parcela, tanto de tipo convencional como digitales descritas en las secciones anteriores. Las bonificaciones en el reparto de agua, a aquellos regantes que sean más eficientes en el uso del agua, pueden servir de estímulo para que otros agricultores implementen medidas de mejora de la eficiencia en sus explotaciones.

Los planes de sequías de CCRR también podrían adaptar el instrumento de cesión temporal de derechos de riego dentro de la CR, para minimizar los impactos económicos de las situaciones de escasez.

Herramientas como los gemelos digitales de CCRR pueden facilitar el desarrollo de planes de actuación que incluyan las propuestas anteriores, por su capacidad para simular múltiples escenarios de disponibilidad de agua y su repercusión sobre los usuarios y decidir a sí cuales son las reglas de actuación en situaciones de escasez más adecuadas para cada CR.