

SUBTEMA 3

Prácticas innovadoras para la gestión del estrés hídrico y la agricultura de secano

La región mediterránea es conocida por su clima cálido y sus limitados recursos hídricos, lo que la hace vulnerable al estrés hídrico y a los efectos del cambio climático. En la región se han desarrollado y aplicado diversas prácticas innovadoras para hacer frente a estos retos de la gestión del estrés hídrico y la agricultura de secano.

1 TÉCNICAS AVANZADAS DE RIEGO

1.1 Instalación de un sistema tradicional de riego eficiente

Hay varias formas de mejorar la eficiencia del agua de riego. En primer lugar, la elección del sistema de riego es un factor crítico: la opción de un sistema de goteo localizado o de *bajo caudal* distribuye el agua lo más cerca posible de las raíces, con lo que así se evita la evaporación excesiva y se limita el crecimiento de malas hierbas. Sin embargo, una distribución muy localizada del agua no estimula el desarrollo de los sistemas radiculares ni en profundidad ni en una gran superficie horizontal, lo que aumenta la dependencia de las plantas del riego. Por lo tanto, la elección del sistema de riego, su colocación y la sincronización de los aportes son factores que contribuyen a mejorar la eficiencia en el uso del agua.

1.1.1 Riego por goteo

El riego por goteo es uno de los sistemas más extendidos para el cultivo de plantas perennes (figura 1). En este sistema, se aplica una cantidad reducida de agua a las raíces de las plantas en forma de gotas continuas o discretas, pequeños chorros o sistemas de pulsos. Se suministran entre 2 y 20 litros por hora desde un tubo estrecho con varios orificios conocidos como *emisores*¹. Es bien sabido que el riego por goteo aumenta la eficiencia en el uso del agua al tener una demanda de agua un 50 % menor que el riego por surcos y reducir el encharcamiento.



Figura 1. Sistema de riego por goteo aéreo en viticultura (autoría de la foto: IFV Sud-Ouest)

1.1.2 Riego deficitario

El riego deficitario (RD) es una estrategia de riego que solo se aplica durante las fases de crecimiento de los cultivos sensibles a la sequía para reducir el consumo de agua.

Existen diferentes tipos de RD (figura 2):

- *RD sostenido*: se basa en la distribución uniforme del déficit hídrico a lo largo de toda la campaña frutícola, con lo que así se evita que se produzca un déficit hídrico grave de la planta en cualquier fase del cultivo que pueda afectar al rendimiento comercializable o a la calidad de la fruta.
- *RD regulado*: se suministra el riego completo durante los periodos críticos de los frutales, mientras que es limitado o incluso innecesario si se suministra un mínimo de agua de lluvia durante los periodos críticos.
- *RD de secado parcial de las raíces*: se basa en regar solo una parte de la zona radicular, dejando que la otra parte se seque hasta alcanzar un determinado contenido de agua del suelo antes de volver a humedecerla desplazando el riego a la parte seca.

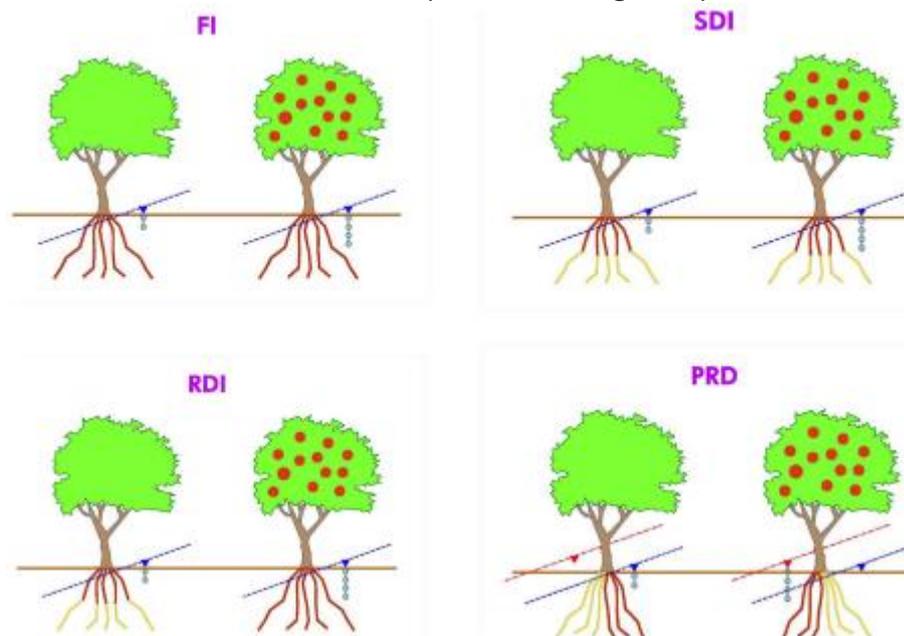


Figura 2. Patrón gráfico de las estrategias de riego completo (RC), riego deficitario sostenido (RDS), riego deficitario regulado (RDR) y secado parcial de raíces (SPR) en frutales.²

❖ RD en huertos de pistachos

A pesar del buen rendimiento del cultivo del pistacho en condiciones de secano, existe una clara tendencia a regar debido a los beneficios en lo relativo a la calidad del fruto y la productividad del cultivo. Se ha estudiado la respuesta al riego deficitario regulado (RDR) en un huerto de pistachos (variedad Kerman) en Ciudad Real (España), con la conclusión de que la aplicación del RDR al 15 % de la evapotranspiración del cultivo (ETc) durante el aumento de peso del pistacho (fase III-fase final de crecimiento del fruto) da lugar a un mayor tamaño del fruto que cuando la misma cantidad de agua de riego se distribuye en fases anteriores³. Además, el RDR al 50 % de ETc en

las fases I (crecimiento rápido de la nuez o semilla) y II (endurecimiento de la nuez o semilla) proporcionó un rendimiento total y un porcentaje de nueces partidas similares a los de los árboles con irrigación completa, además de permitir un ahorro de agua del 20 %⁴. Estos ejemplos ilustran que el riego deficitario es una estrategia posible para reducir el consumo de agua sin afectar significativamente al rendimiento.

❖ *RD en huertos de cerezos*

Se estudió la respuesta agronómica del cerezo dulce Prime Giant mediante estrategias de RD en un clima mediterráneo semiárido en un huerto comercial del sureste de España (Jumilla, España). El tratamiento con RDR, regado con ETc al 100 % durante la precosecha y la diferenciación floral y ETc al 55 % durante la poscosecha, redujo el crecimiento vegetativo durante cuatro años sin penalizar el rendimiento total de los frutos ni su calidad, en particular su tamaño. Este tratamiento permitió un ahorro de agua del 39 % en comparación con el tratamiento de control sin restricción⁵. Además, el RDR produjo una incidencia significativamente más baja de rajado de la fruta, lo que podría prolongar la vida útil de la fruta.

El mismo resultado se obtuvo con la aplicación posterior a la cosecha de un riego deficitario parcial (IDP) del 30 % y el 50 % durante tres años en cerezos Sweetheart en el valle de Okanagan (sur de la Columbia Británica, Canadá). La reducción de agua no tuvo efectos duraderos sobre el estado hídrico de los árboles, las tasas de fotosíntesis ni el crecimiento de las plantas⁵. El IDP tampoco influyó en el rendimiento de la fruta, ni en su calidad en el momento de la cosecha, ni en las condiciones de almacenamiento y conservación⁶. Estos resultados sugieren que los tratamientos con RDR e IDP en los huertos de cerezos pueden reducir significativamente el uso de agua de riego sin comprometer la producción ni la calidad de la fruta.

❖ *RD en huertos de almendros*

Además, se evaluaron en Marruecos los efectos del riego deficitario regulado (RDR) en lo referente a la reducción de los efectos adversos del estrés hídrico sobre el rendimiento del almendro Tuono. Los tratamientos de riego consistieron en RDR con ETc al 75 % y ETc al 50 % aplicados durante los periodos de ralentización del crecimiento del fruto correspondientes a las fases II (endurecimiento del hueso) y III (fase final del crecimiento del fruto) en almendros (figura 3). Se informó de que se ahorraba hasta un 50 % de agua durante el periodo de ralentización del crecimiento de la fruta, con mejoras en la calidad de la fruta sin disminuir el rendimiento total⁷. Las almendras generadas en condiciones de riego deficitario reciben el nombre de [hydroSOStainable](#), lo que indica que son productos respetuosos con el medioambiente y que ahorran agua, con una mayor calidad nutricional, funcional y sensorial. Este concepto se desarrolló en España y está registrado en la Oficina Española de Patentes y Marcas desde 2017⁸. La investigación sobre cómo influyó esta información en el gusto y la preferencia de los consumidores españoles y polacos por las almendras tostadas etiquetadas como *hydroSOStainable* y *convencionales*, mediante preguntas sobre el grado de satisfacción y la disposición a pagar, reveló que el 77 % de estos consumidores estaban dispuestos a pagar un precio más alto por las almendras etiquetadas como *hydroSOStainable*⁸.

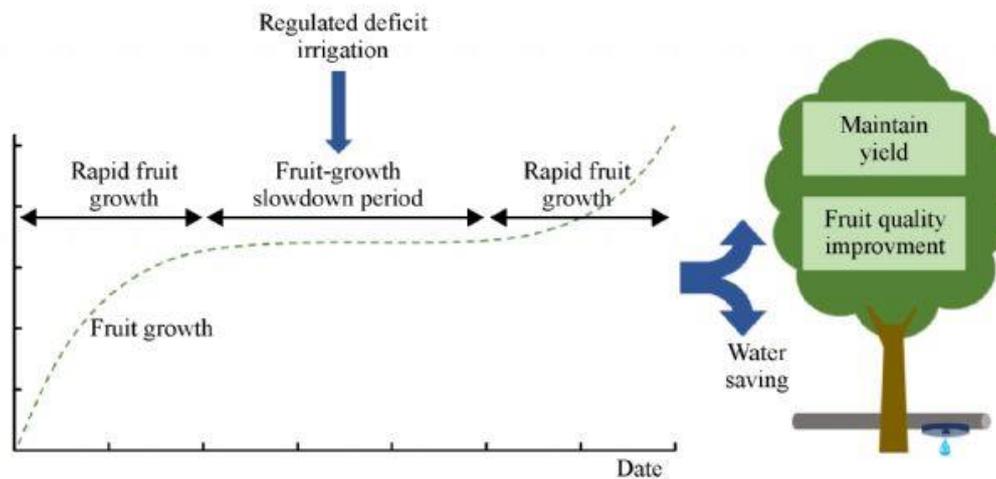


Figura 3. Resumen gráfico de la aplicación de RDR ⁷

❖ *RD en olivares*

También se ha aplicado el RD durante tres años en un olivar joven en superintensivo (variedad Arbequina) en el noreste de España⁹. La estrategia de RDR (ETc al 50 %) aplicada durante el crecimiento vegetativo estival produjo resultados prometedores basados en una tasa de ahorro de agua del 19 % sin afectar al peso de la aceituna en la cosecha ni al rendimiento en aceite. Además, en la parcela Koroneiki de Chipre de 17 años y baja densidad, la aplicación de una ETc al 70 % durante las fases de crecimiento sensibles al estrés hídrico (crecimiento de los brotes, floración e hinchamiento de las yemas) y del 35 % durante las fases de crecimiento tolerantes al estrés hídrico (endurecimiento del hueso, acumulación de aceite) dio lugar a un ahorro de agua de riego del 32 % sin afectar al rendimiento ni a la calidad de la aceituna o del aceite ¹⁰.

1.1.3 Riego subterráneo

El grupo operativo francés **OFIVO** (GO) examinó el efecto del riego por goteo aéreo y subterráneo en un viñedo utilizando sondas capacitivas de suelo (bulbos húmedos, figura 4). La aplicación de riego subterráneo (40 cm de profundidad) en el centro de la hilera generó mayores volúmenes de bulbo húmedo (con percolación vertical y lateral del agua) que el sistema de riego por goteo aéreo (figura 5). En el riego subterráneo, el agua llega a la superficie del suelo por capilaridad sin modificar el estado hídrico de las vides ni los rendimientos en comparación con el riego aéreo.



Figura 4. Uso de una sonda capacitiva para estudiar el comportamiento del agua en el suelo: [GO OFIVO](#)

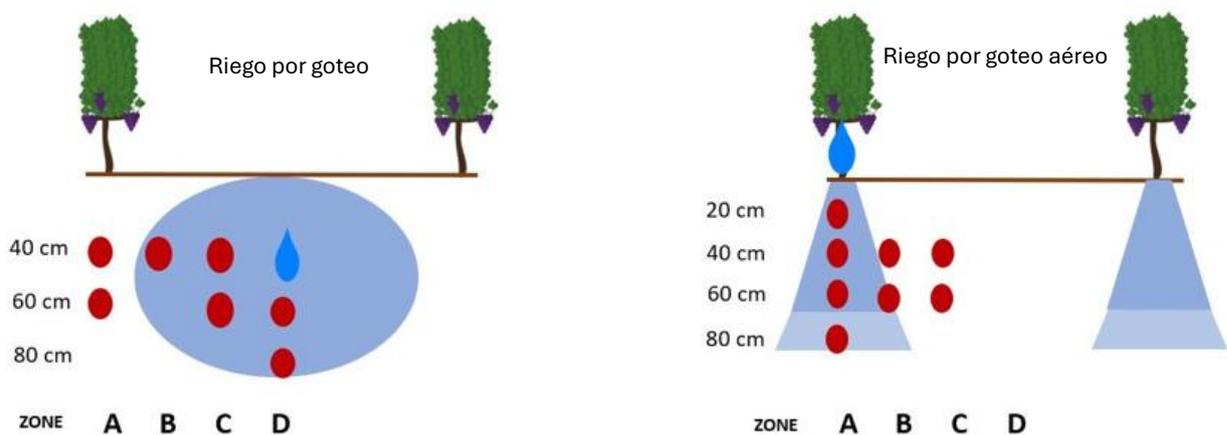


Figura 5. Colocación de sondas capacitivas en tratamientos de riego subterráneo y aéreo ¹¹

El riego por goteo subterráneo facilita la gestión mecánica de las malas hierbas y mejora la expansión de las raíces entre las hileras. El principal beneficio de este sistema de riego en la zona mediterránea es la eficiencia en el uso del agua, lo que facilita el establecimiento de la cubierta vegetal y el correcto estado hídrico del cultivo en zonas secas. Sin embargo, este sistema resulta más caro de instalar que un sistema de goteo aéreo (+20 %) e inadecuado para suelos pedregosos. Además, se aplicó la estrategia de fertirrigación completa, que mostró la mejor relación entre rendimiento y madurez. Este sistema redujo considerablemente los aportes (un 30 % menos de fertilizantes). También hay que tener en cuenta el final de la vida útil del sistema y evitar la contaminación del suelo con residuos plásticos.

1.2 Sistemas de riego inteligente

1.2.1 Viñedos

En el norte de Italia, el [grupo operativo VIRECLI](#) aplicó un sistema de riego de precisión para mantener los niveles de producción y calidad de las uvas destinadas a la elaboración de vino

espumoso, incluso en las añadas más difíciles. Al optimizar el uso del agua, lograron una mayor producción con características de calidad superiores en comparación con la gestión en la explotación y los sistemas sin riego, a pesar de la grave sequía. Los resultados fueron especialmente significativos en las parcelas de viñedo con mayores necesidades hídricas.

Para diseñar correctamente el sistema de riego es necesario un análisis exhaustivo de las características del suelo y de su variabilidad dentro del viñedo. Para ello se pueden utilizar tecnologías de vanguardia como las basadas en la adquisición de la resistencia eléctrica del suelo, que están estrechamente correlacionadas con los principales parámetros fisicoquímicos del suelo. Las indicaciones así obtenidas permiten dividir el viñedo en zonas homogéneas, dentro de las cuales las propiedades hidrológicas son uniformes. Cada zona homogénea se caracteriza finalmente mediante los datos edafológicos obtenidos en la encuesta, que dan lugar a un mapa de vigor (figura 6). A partir de la información recopilada, el caudal de los goteros varía dentro del viñedo para satisfacer las necesidades hídricas de las zonas de gestión homogéneas definidas (figura 7). Es necesario utilizar un sistema de ayuda en la toma de decisiones (DSS) para guiar el riego (es decir, un DSS que tenga en cuenta el contenido de agua del suelo y las necesidades de las plantas, junto con la previsión meteorológica) para identificar el mejor momento para regar. Los sistemas probados fueron Irriframe ANBI, basado en un equilibrio hídrico clásico, y Manna de Rivulis, integrado con datos vía satélite. Ambos sistemas se calibraron adecuadamente con mediciones sobre el terreno del estado real del agua de la planta.

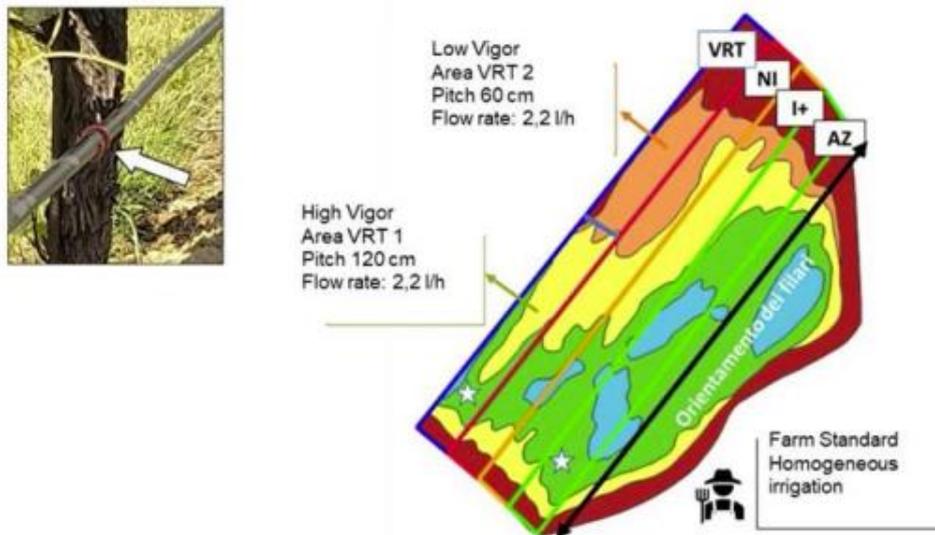


Figura 6. Ejemplo de distribución de diferentes tesis de riego y características de un sistema de riego de caudal variable: [grupo operativo VIRECLI](#)



Figura 7. Pinzas de riego aplicadas a los goteros para cerrarlos y modular la distancia, y obtener un sistema de goteo de caudal variable: [grupo operativo VIRECLI](#)

1.2.2 Viñedo de uva de mesa

El consumo de agua de un viñedo de uva de mesa de 2 hectáreas en la región de Apulia (sur de Italia) puede oscilar entre 2000 y 6000 litros por temporada, dependiendo de la técnica de riego aplicada y de las necesidades específicas de la variedad, lo que subraya la importancia de la eficiencia en el uso de los recursos. El [grupo operativo OLTREBIO](#) instaló sensores interconectados a nivel de suelo y cultivo en una explotación agrícola (figura 8), que se comunicaban con el sistema de apoyo a la toma de decisiones (DSS) para la gestión del agua en viñedos ecológicos de uva de mesa con el fin de optimizar los recursos. El uso del agua se registra y gestiona de forma estacional con la ayuda de sensores del Internet de las cosas (IoT) a varios niveles (suelo y cultivo) utilizando datos meteorológicos obtenidos localmente (figura 9). Los datos se recogen en el software Blueleaf®. El sistema DSS, un componente clave, está adaptado al viñedo de uva de mesa y desempeña un papel crucial en la gestión del uso del agua durante los periodos críticos de escasez hídrica. El beneficio para los usuarios del DSS es el uso eficiente de los recursos hídricos, con un ahorro de agua entre el 30 % y el 40 % aproximadamente, según las tendencias estacionales y del tiempo de trabajo del agricultor, sin comprometer la producción de los cultivos ni la calidad de la fruta.



Figura 8. Sensores a nivel del suelo y del cultivo: [grupo operativo OLTREBIO](#)



Figura 9. Método de comunicación entre *hardware* y *software*: [grupo operativo OLTREBIO](#)

1.2.3 Huerto de aguacates

Debido a la mayor rentabilidad económica del aguacate y a las nuevas condiciones climáticas, los agricultores europeos están recurriendo a él como sustituto de otros cultivos. El aguacate es sensible a la sequía y a la asfixia radicular, por lo que necesita un volumen de agua exacto para crecer y producir frutos. Las raíces poco profundas limitan la capacidad de explotar grandes volúmenes de suelo y utilizar plenamente las precipitaciones almacenadas. Muchos agricultores necesitan familiarizarse con las técnicas agronómicas más adecuadas y adaptadas a las condiciones específicas. En este contexto, el [grupo operativo GO AVOCADO](#) ha liderado el desarrollo de nuevas prácticas de cultivo, como el uso de sondas de capacitancia (figura 10) combinadas con drones y [mapas agroclimáticos](#) (figura 11). Antes de la plantación, hay que consultar el mapa agroclimático para determinar si la parcela reúne las condiciones óptimas. Al mismo tiempo, un sistema de riego adecuado resulta esencial para la eficiencia hídrica, con independencia de la ubicación de la parcela. Se pueden elegir sondas capacitivas para determinar las necesidades de riego en cada momento (algunas son autónomas y funcionan con un pequeño panel solar). Estas sondas pueden determinar el contenido de humedad, la salinidad y la temperatura del suelo a diferentes profundidades. La estimación del contenido de humedad del suelo se basa en la medición de la constante eléctrica del suelo mediante electrodos, que pueden detectar oscilaciones en la constante, ya que el suelo es un sustrato conductor de la electricidad. Estas variaciones en el valor de la constante eléctrica se correlacionan con la capacitancia del suelo o el contenido de humedad. El mismo sistema se utiliza para estimar la salinidad del suelo.



Figura 10. Sonda de capacitancia en una plantación de cítricos, similar a las utilizadas en el [grupo operativo GO AVOCADO](#)

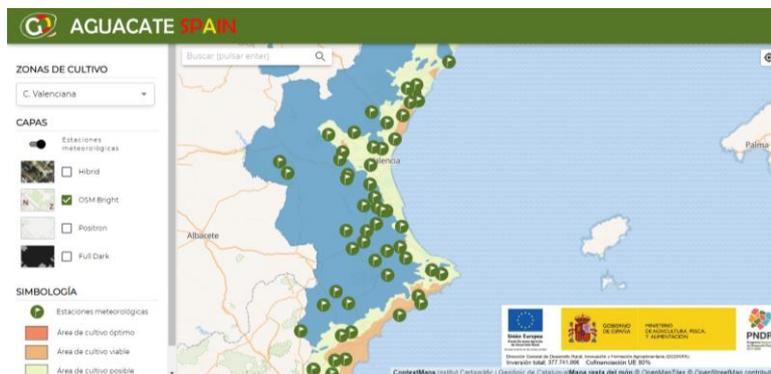


Figura 11. Mapa agroclimático: [grupo operativo GO AVOCADO](#)

Las sondas de capacitancia miden el contenido volumétrico de agua del suelo (VWC) con precisión y en tiempo real, lo que permite controlar los niveles de humedad en la zona radicular, detectar cambios o desviaciones tras los riegos o las precipitaciones e identificar patrones de secado entre riegos. Con esta información, el técnico puede ajustar la frecuencia y la duración de los riegos en función de las necesidades reales del cultivo del aguacate. Además, así se evita el riego excesivo y se previene el estrés hídrico. Por último, aunque el uso de sondas de capacitancia para la gestión del agua de los cultivos supone inicialmente un coste adicional debido al elevado precio de la tecnología, produce importantes ahorros de agua, fertilizantes y energía al aplicar solo las cantidades necesarias.

La figura 12 muestra la humedad detectada por las sondas a cuatro profundidades (negro 10 cm, rojo 30 cm, azul 50 cm, amarillo 70 cm). Después de cada riego, el contenido de agua del suelo aumenta en mayor medida en los primeros centímetros y es prácticamente imperceptible en los

niveles más profundos. Los puntos rojos y negros muestran la actividad radicular, es decir, los momentos en que las raíces absorben agua.

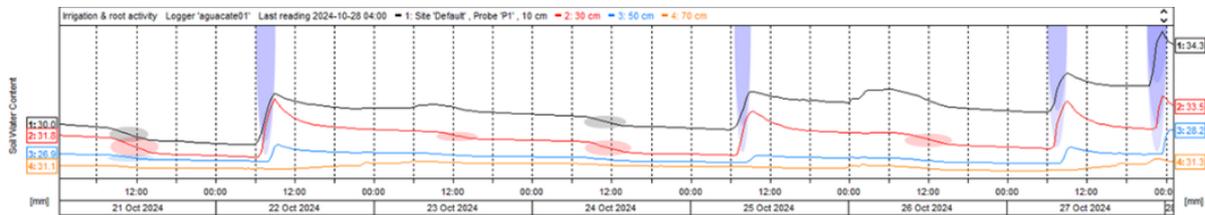


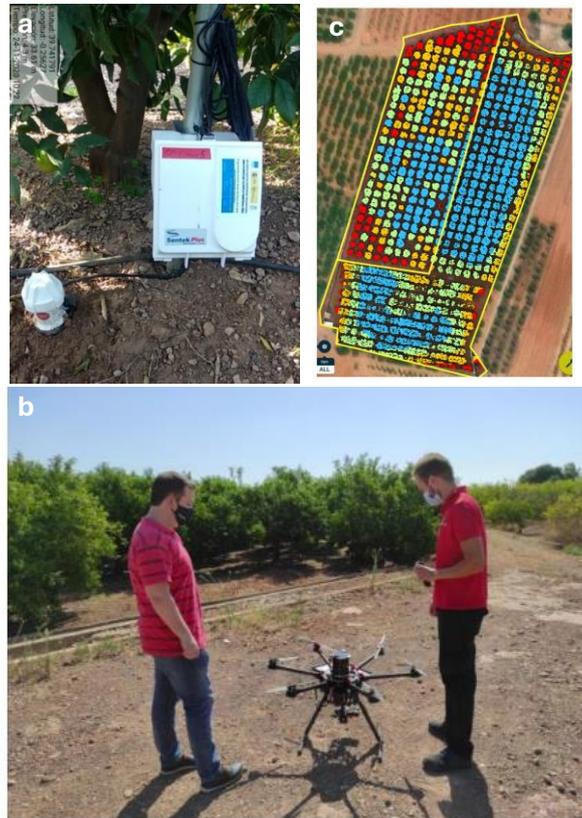
Figura 12. Gráfico de los datos de la sonda de capacitancia sobre la evolución del contenido de agua del suelo a diferentes profundidades y después de los riegos: [grupo operativo GO AVOCADO](#)

Para determinar el volumen exacto de agua que necesita el cultivo de aguacate, el [grupo operativo GO AVOCADO](#) controla el consumo instantáneo y adapta el régimen de riego a las necesidades reales de la planta. Se calcula que una hectárea de aguacate consume unos 6300 m³ al año (Manual de gestión práctica del cultivo del aguacate). Este cultivo necesita una humidificación constante en la zona radicular, con el 50 % de las raíces situadas en los primeros 30 cm del suelo. Así, se observó que el aumento del número de días de riego, pero aplicando un menor volumen de agua en cada riego, incrementaba los rendimientos en comparación con el riego durante más días con un mayor volumen de agua. Esto se debe a que los riegos cortos y continuos mantienen la superficie del suelo constantemente húmeda. Se ha observado que la instalación de goteros de ultrabajo caudal (0,6 l/h) dispuestos en 4 hileras de líneas de goteros genera una humectación constante en los primeros centímetros del suelo.

1.2.4 Huerto de cítricos

El [grupo operativo GO CITRICS](#) realizó una prueba piloto del cultivo de cítricos mediante cámaras termográficas, drones, información por satélite y sensores de capacitancia para determinar las zonas con excesos o déficits de riego para equilibrar este aspecto. Con los datos obtenidos se ha podido determinar el agua disponible en el sistema de riego y, gracias a la aplicación de las correcciones oportunas, la información así adquirida puede darse a conocer a los agricultores para que la apliquen en sus explotaciones. Puede resultar difícil utilizar este método en algunas zonas de producción debido a los conocimientos necesarios para manejar este tipo de tecnología. Por este motivo, el [grupo operativo GO CITRICS](#) trabaja en la formación de los agricultores para facilitarles la interpretación de la valiosa información que proporcionan las sondas y otros sistemas de seguimiento. Las sondas de capacitancia sobre el terreno permiten programar el riego en función del momento óptimo y la cantidad de agua necesaria según la humedad del suelo detectada por los sensores (figura 13a). Asimismo, los datos obtenidos de los vuelos de drones equipados con una cámara hiperespectral (figura 13b) y de las imágenes por satélite permitieron detectar fallos en los sistemas de riego, poniendo de relieve las zonas con exceso o falta de riego (figura 13c). Estas detecciones se llevan a cabo mediante el seguimiento de índices vegetativos como el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Este parámetro se basa en la detección de longitudes de ondas infrarrojas y proporciona una valiosa información para prevenir el estrés de los cultivos antes de que aparezcan los síntomas en la

planta. La detección del estrés permite su corrección temprana, la reparación de los posibles fallos y la adaptación de las estrategias de riego a las necesidades del cultivo. Además, el *mulching* de paja de arroz genera beneficios en lo referente a la reducción de las necesidades de riego en un 30 % y de un mayor rendimiento en un 10 % en comparación con las condiciones



tradicionales con un riego de ETC al 100 % y sin *mulching*.

Figura 13 a) Sensor de capacitancia; b) plataforma digital con los resultados hidrológicos; c) dron equipado con cámaras termográficas: [grupo operativo GO CITRICS](#)

1.2.5 Huerto de almendros

Otro ejemplo de DSS es la detección directa en la planta, una innovadora herramienta de planificación del riego para determinar el estrés hídrico en los almendros. Esta tecnología es una combinación de sensores de plantas y algoritmos de estrés vegetal. El tronco de un almendro se encoge durante el día como respuesta a la disminución del nivel de agua. Cuanto más se estresa, más se contrae antes de recuperar su tamaño de nuevo por la noche. El programa informático desarrollado utiliza este mecanismo de contracción-hinchamiento para cuantificar el estrés hídrico¹¹. El dendrómetro registra el estado de la planta automáticamente cada día (figura 14) y se comunica directamente al teléfono móvil o al ordenador del agricultor. El programa informático transforma automáticamente las lecturas en alertas de estrés y recomendaciones de riego con un uso óptimo del agua.



Figura 14. [Dendrómetro](#)

1.2.6 Huerto de olivos

El riego de precisión basado en el crecimiento diario del tronco mediante un dendrómetro, instalado a 15 cm del suelo en el tronco principal de los árboles, se aplicó durante tres años en un olivar joven en superintensivo (variedad Arbequina) en el noreste de España⁹. Según los datos del dendrómetro, el riego en julio y agosto (parada del crecimiento vegetativo estival) se produjo tras dos días consecutivos de disminución del diámetro del tronco. El dendrómetro tomaba y enviaba mediciones cada 15 minutos por radio a un registrador de datos. La producción de aceite de oliva aumentó un 7 % y las variables vegetativas no mostraron reducciones significativas, lo que se tradujo en un ahorro de agua del 31 % en comparación con la estrategia de control.

2 AGRICULTURA DE SECANO

Este tipo de agricultura se basa en la humedad natural retenida en el suelo y en técnicas agrícolas específicas para garantizar que los cultivos reciban suficiente agua para su crecimiento. Sin embargo, la agricultura de secano requiere un alto nivel de conocimientos y experiencia, ya que los agricultores deben ser capaces de evaluar el estado del suelo y adaptar las técnicas a las cambiantes condiciones meteorológicas.

2.1 Mejora de la retención de agua en el suelo mediante hidrogeles

Los viñedos de ladera de la provincia Emilia-Romaña (norte de Italia) son cada vez más vulnerables a los efectos del cambio climático. El aumento de las temperaturas, la irregularidad de las precipitaciones y las sequías prolongadas están ejerciendo una presión considerable sobre las prácticas vitícolas tradicionales. En respuesta a estos retos, el proyecto [IN+VITE](#) ha explorado el uso de hidrogeles, también conocidos como *polímeros superabsorbentes*, para mejorar la retención de agua en los suelos y optimizar su uso en los viñedos de secano. Estos materiales pueden absorber y retener grandes cantidades de agua y liberarla gradualmente con el tiempo. Los hidrogeles están formados por una red de cadenas poliméricas con grupos hidrófilos que les permiten absorber agua hasta varios cientos de veces su peso. Los recientes avances en la producción de variantes biodegradables y la reducción de los costes de fabricación han reavivado el interés por los hidrogeles, sobre todo porque el cambio climático agrava la

escasez de agua. Los ensayos de campo revelaron que la adición de hidrogel al suelo arenoso aumentaba significativamente su capacidad de retención de agua. Esta mejora se traduce directamente en una mayor disponibilidad de agua para las plantas, en especial durante los periodos secos, lo que redujo la necesidad de riego y mejoró el crecimiento (figura 15) y la supervivencia de las cepas, con un 6,2 % de cepas muertas frente al 15,6 % en el control. Además, el hidrogel se aplicó en el momento de la plantación en un viñedo de Sauvignon Blanc recién plantado en la región de Colli Piacentini. Los resultados preliminares indicaron que las vides tratadas con el hidrogel presentaban un mejor estado hídrico y un crecimiento más robusto en comparación con las no tratadas. Este hallazgo sugiere que los hidrogeles podrían desempeñar un papel crucial en el éxito del establecimiento de nuevos viñedos.

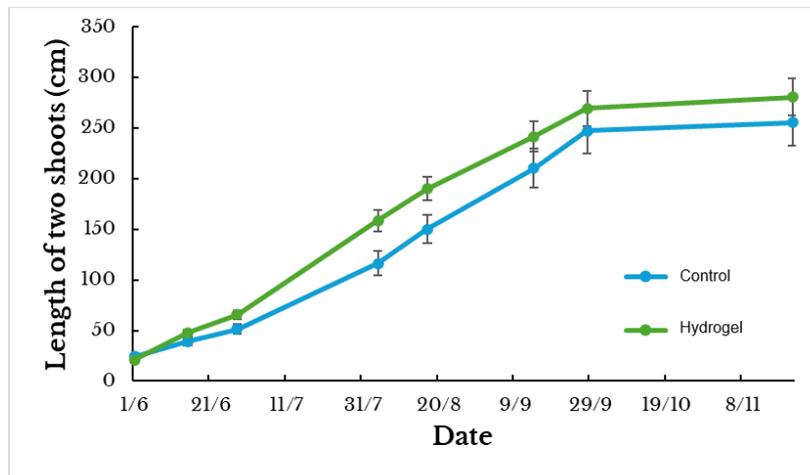


Figura 15. Efecto del hidrogel sobre la longitud de dos brotes en la vid: proyecto [IN+VITE](#)

2.2 El biocarbón mejora la retención de agua en el suelo

El biocarbón se crea calentando biomasa, como residuos de huertos o cáscaras de almendra, entre 500 °C y 700 °C en un proceso llamado pirólisis. El resultado es una sustancia calcárea negra que varía en el tamaño de la partícula. El biocarbón mejora la retención de nutrientes gracias a una mejor capacidad de intercambio catiónico (CIC), aumenta la retención de agua en el suelo hasta un 300 % (dependiendo del tipo de biocarbón en cuestión, ya que su porosidad es elevada), corrige la acidez, airea el suelo y desarrolla la vida microbiana (figura 16). El biocarbón es un producto muy estable; tras una aplicación, puede tener efectos notables durante 10 años, y su uso en tierras de cultivo puede reducir la frecuencia de riego. Esto es especialmente importante en zonas con escasez de agua o semiáridas y en suelos arenosos¹⁵.

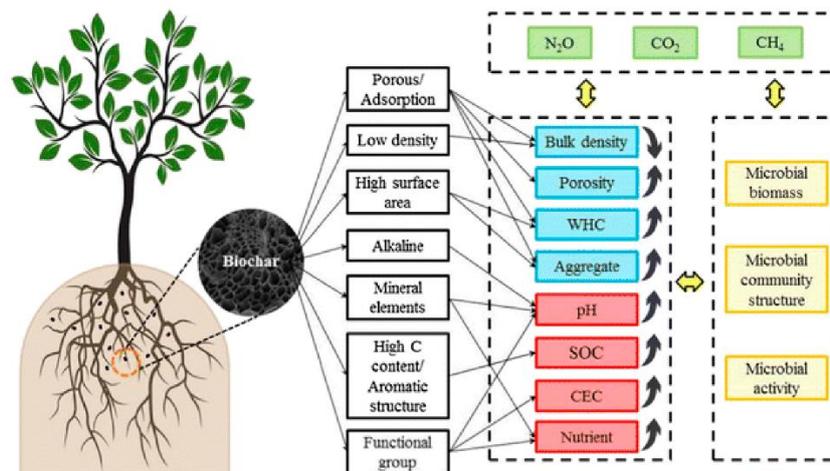


Figura 16. Efecto del biocarbón en las propiedades físicas, químicas e hidráulicas del suelo¹⁵

2.3 Prácticas de gestión del suelo

Las prácticas sostenibles de gestión del suelo son cruciales para preservar su salud y mitigar los efectos adversos sobre el rendimiento de las plantas. El grupo operativo portugués [Nuevas prácticas en olivares de secano](#) evaluó los efectos del laboreo convencional y de la autorresiembrado de cultivos anuales de cobertura con leguminosas sobre el rendimiento fisiológico de las plantas y las propiedades del suelo. La aplicación de cultivos de cobertura con leguminosas redujo el riesgo de erosión del suelo, mejoró la fertilidad del suelo, evitó la pérdida de contenido de agua del suelo por evaporación e incrementó la capacidad de retención de agua. Por lo tanto, el uso de cultivos de cobertura con leguminosas es una estrategia prometedora para la gestión sostenible del suelo en olivares de secano, ya que puede proporcionar numerosos servicios ecosistémicos como la fijación de nitrógeno, el alojamiento de organismos beneficiosos y el aumento de la retención de agua.

Un experimento vitícola realizado en Francia ([proyecto VITIMULCH](#)) demostró que la presencia de *mulching* inertes exógenos, como residuos verdes y ostras trituradas (figura 17), bajo la hilera puede aumentar la humedad del suelo hasta un 20 % en una añada seca (en función de la materia prima utilizada, figura 18). Además, los *mulching* inertes pueden mejorar la estructura del suelo y sus propiedades fisicoquímicas, como el pH o la materia orgánica. Por ejemplo, la aplicación anual de residuos verdes compostados bajo la hilera (15 cm de grosor y 60 cm de ancho) mejoró la materia orgánica del suelo del 1,6 % al 4,3 % y permitió mantener un 10 % más de humedad en el suelo que en suelo desnudo.



Figura 17. Fieltro vegetal bajo vid cruda

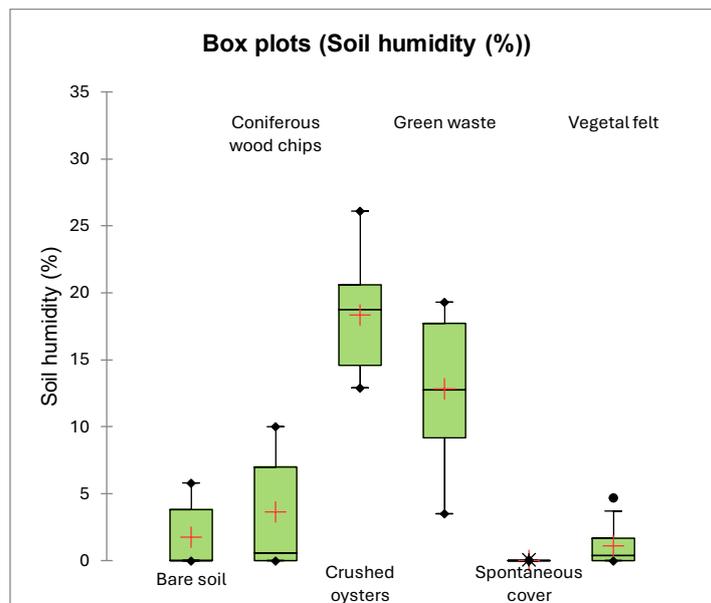


Figura 18. Humedad del suelo (%) a 15 cm de profundidad para diferentes *mulching* inertes exógenos bajo vid cruda, añada 2023, proyecto Vitimulch. Barras de izquierda a derecha: suelo desnudo, ostras trituradas, virutas de madera de coníferas, residuos verdes, cubierta espontánea, fieltro vegetal

2.3.1 Líneas clave

La degradación del suelo en los últimos 40 años ha provocado una disminución próxima al 30 % en la capacidad de retención de agua de los suelos agrícolas, lo que compromete su capacidad de respuesta ante fenómenos meteorológicos catastróficos¹⁶. La introducción de técnicas de laboreo a lo largo de líneas, llamadas líneas clave (figura 19), identificadas a lo largo de los flujos naturales de agua, puede contribuir significativamente a prevenir la erosión del suelo y a mejorar su capacidad de retención de agua.



Figura 19. Diseño de líneas clave en el viñedo Domaine des Quarres en Layon, Francia

(autoría de la foto: Domaine des Quarres)

El diseño de líneas clave es un sistema de gestión del agua agrícola que utiliza la fuerza de la gravedad para ralentizar la escorrentía de las aguas superficiales, interceptarla y distribuirla lentamente lejos de las zonas (valles) con altos niveles de erosión. Esto se consigue diseñando patrones de cultivo precisos que siguen la dirección de las líneas clave aguas arriba y aguas abajo, lo que garantiza un comportamiento coherente del agua en toda la pendiente¹⁷.

El diseño de las líneas clave comienza siempre con un levantamiento topográfico (GPS, dron, teledetección, estación total) para obtener un mapa de curvas de nivel de la zona considerada. Mediante una curva de nivel como referencia, una línea denominada *línea clave* se cruza aguas arriba de la curva de referencia y atraviesa la curva de referencia con una ligera pendiente. Se traza un esquema que representa el patrón de cultivo trazando la línea clave paralela a los flujos aguas arriba y aguas abajo (figura 20). En la práctica, el agua se ve obligada a fluir en la dirección de las líneas clave a través de las operaciones de labranza y cultivo (por ejemplo, arrancar, rastrear, sembrar, cosechar, etc.) para los cultivos herbáceos, la aireación para los pastos y cultivos permanentes, y los sistemas de regulación de las aguas superficiales (por ejemplo, zanjas).

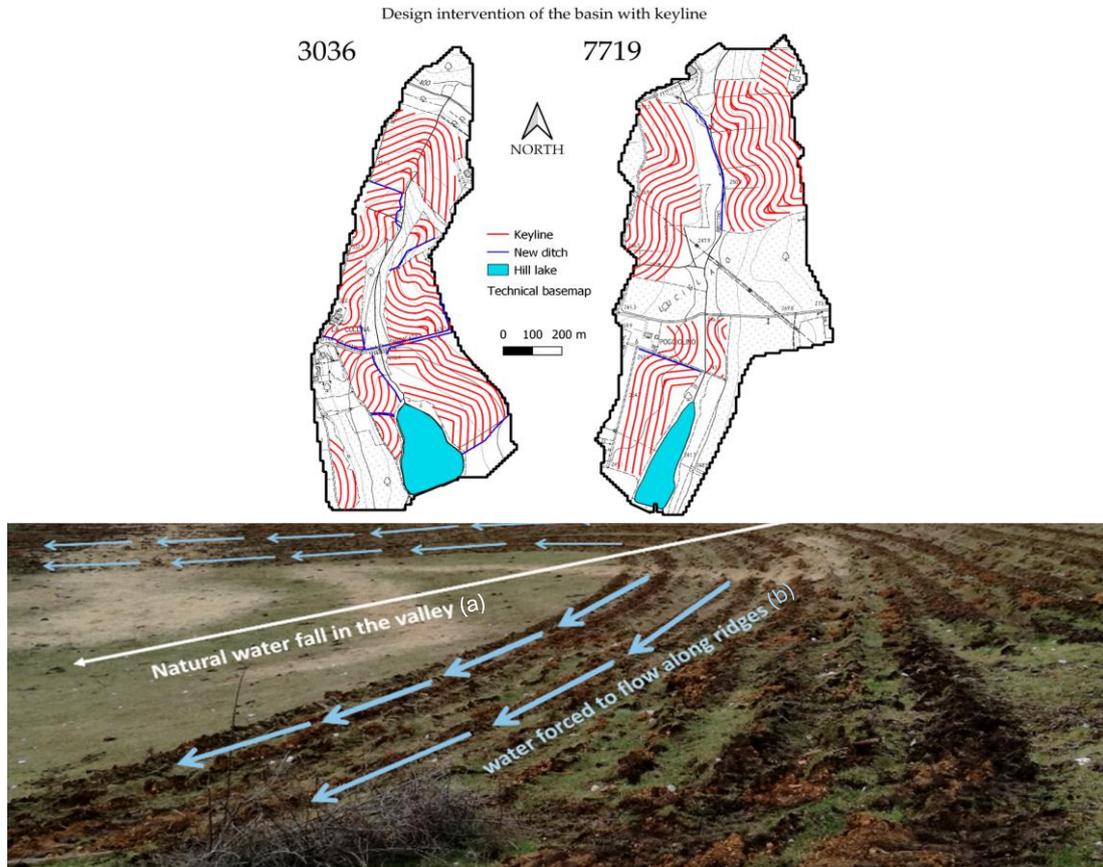


Figura 20. Disposición de las líneas clave en tierras de cultivo (arriba) y ejemplo de labranza siguiendo el diseño de las líneas clave: a) cascada natural en el valle; b) agua forzada a fluir a lo largo de las crestas¹⁷

En un estudio realizado en Italia se observó que las líneas clave influían significativamente en la distribución de la escorrentía y en la humedad del suelo en dos cuencas hidrográficas de Mugello (Florencia)¹⁷. La introducción de líneas clave con zanjas de 20 cm de profundidad, situadas a unos 25 m entre sí, reduce los fenómenos erosivos entre líneas clave, mientras que el flujo de salida sigue las líneas clave. El estudio también encontró un aumento en el índice de humedad topográfica (TWI) debido al flujo de salida significativo en líneas clave, lo que indica que la topografía controla el movimiento del agua y los patrones espaciales de humedad del suelo (figura 21).

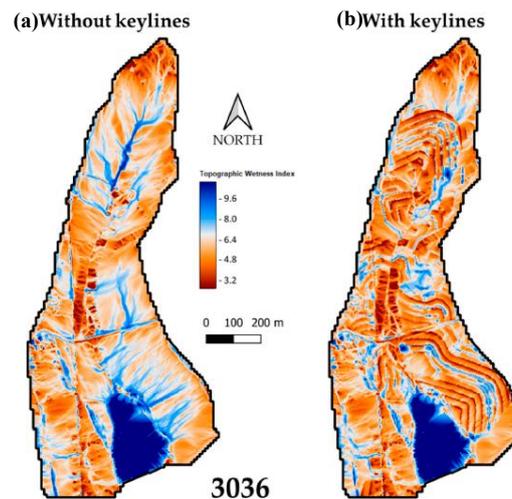


Figura 21. Mapas TWI sin (a) y con (b) líneas clave para la misma cuenca¹⁷

3 MEDIDAS DE ADAPTACIÓN

El sector agrícola es el mayor consumidor de agua en las regiones mediterráneas áridas y semiáridas, donde el agua de riego representa entre el 50 % y casi el 90 % del total del agua consumida¹⁸. Muchos países mediterráneos (entre ellos Egipto, Libia, Túnez, Argelia, Marruecos, Siria, Malta y Líbano) presentan una disponibilidad de agua inferior a 1000 m³ persona⁻¹año⁻¹¹⁹. Los sistemas de riego, junto con tecnologías avanzadas y buenas prácticas encaminadas a obtener recursos complementarios pueden aumentar la eficacia del riego y reducir el despilfarro de agua.

3.1 Desalinización

La capacidad de desalinización ha aumentado en las últimas décadas en la cuenca mediterránea, y se prevé que la producción de agua de mar desalinizada en la región de Oriente Próximo y el norte de África sea trece veces mayor en 2040 que en 2014; Argelia, Egipto, Israel, Italia y España son actualmente los países más avanzados en este sentido²⁰. La desalinización aborda la escasez mundial de agua, ya que el agua de mar representa una fuente de agua abundante y estable que elimina eficazmente las limitaciones climatológicas e hidrológicas. Las tecnologías de desalinización actuales incluyen lo siguiente:

- **Tecnologías de membrana:** la ósmosis inversa (OI) es la técnica más utilizada. Consiste en filtrar el agua a través de membranas que retienen la sal a alta presión. La inversión eléctrica de la diálisis (EDR) es otro proceso de membrana en el que las sales se separan del agua aplicando una diferencia de potencial eléctrico.
- **Tecnologías térmicas:** utilizan el calor para evaporar el agua y condensarla de nuevo. Las tecnologías térmicas incluyen la destilación instantánea de múltiples etapas (MSF), la destilación de efecto múltiple (MED), la compresión térmica de vapor (TVC) y la compresión mecánica de vapor (MVC). La destilación por membrana (MD) es un proceso térmico híbrido emergente que utiliza membranas.

La destilación instantánea de múltiples etapas y la ósmosis inversa dominan actualmente el mercado mundial de la desalinización, siendo esta última, con diferencia, la tecnología más utilizada en la UE, con un 88,5 % de la capacidad total²¹.

Las instalaciones de la UE pueden suministrar hasta 3400 millones m³ de agua desalinizada al año (capacidad activa), principalmente a partir de agua de mar y agua salobre. En la UE hay instaladas unas 2178 plantas desalinizadoras (España 41 %, Grecia 19 %, Italia 18 %, Alemania 4 % y Francia 3 %)²¹.

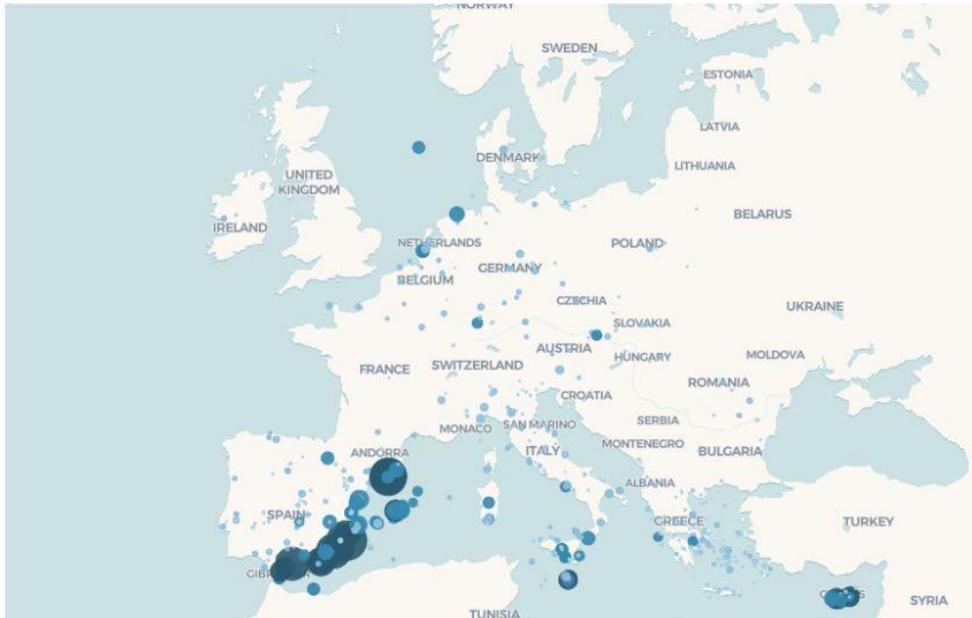


Figura 22. Distribución geográfica de las plantas desalinizadoras en la UE 27, 2024 ²¹

Uno de los principales problemas que limitan el uso del agua de mar desalinizada (DSW) en la agricultura es su elevado coste económico y energético en comparación con otros suministros de agua. Es necesario tener en cuenta algunos aspectos agronómicos para evitar efectos adversos inesperados. Se ha señalado que la sostenibilidad del sistema requiere también la corrección de varios problemas de calidad del agua, centrados principalmente en la mejora de la calidad de la DSW mediante técnicas de desalinización para reducir los niveles de boro (B) y en los procesos de remineralización para equilibrar las concentraciones de cationes y aumentar el pH y la alcalinidad.

El uso de energías renovables para alimentar las plantas desalinizadoras es una posible solución para reducir el coste de producción de la DSW. El archipiélago canario (España) es un territorio con gran potencial eólico y capacidad de desalinización. La energía eólica se conecta a las plantas desalinizadoras para reducir el coste de la DSW. El coste energético variable de la DSW puede reducirse en un 35 % de media anual²². Por otro lado, se instaló una planta de energía fotovoltaica en la estación desalinizadora de agua de mar de Mutxamel, situada en la región de Alicante, en la costa oriental de España, para conseguir unos costes competitivos de producción de agua desalinizada. Estas instalaciones reducen los costes energéticos en torno a un 50 % y ahorran entre un 20 y un 30 % en los costes finales de producción de agua²³.

3.2 Reutilización del agua

El volumen de aguas residuales producidas en los países meridionales y orientales del Mediterráneo se estimó en 81,34 billones de m³, lo que la convierte en una valiosa fuente de agua en términos de cantidad²⁰. Organizaciones internacionales como la FAO fomentan cada vez más la reutilización de las aguas residuales para preservar los recursos hídricos. En 2010, se calcula que 20 millones de hectáreas se regaron con aguas residuales brutas o diluidas, lo que supone alrededor del 10 % de las tierras de regadío; solo 500 000 hectáreas se riegan con aguas residuales tratadas. Los índices de reutilización de aguas residuales pueden alcanzar el 90 % en las regiones áridas y semiáridas (Israel, Jordania), entre el 25 % y el 30 % en el sur del Mediterráneo, el 14 % en España y el 8 % en Italia²⁴.

En la UE se tratan anualmente más de 40 000 millones m³ de aguas residuales, pero solo el 2,4 % se trata para su reutilización. Mientras que unos pocos países recuperan casi todas sus aguas residuales depuradas (hasta el 89 %), la mayoría únicamente recupera un porcentaje ínfimo (tan solo el 5 % en algunos casos) o no practica la reutilización del agua. Esto muestra un potencial considerable para hacer un uso más eficiente del agua²⁴.

Las aguas residuales regeneradas son una de las soluciones que hay que desarrollar para responder al reto de mantener un acceso sostenible al agua, sobre todo para la agricultura y la viticultura. El objetivo de las aguas residuales regeneradas consiste en suministrar una cantidad adicional de agua de una calidad adecuada para un uso determinado sin tener que esperar a que la depure un ciclo natural.

3.2.1 Reutilización del agua y riego agrícola: marco normativo

El Reglamento de la UE de 25 de mayo de 2020 sobre los requisitos mínimos para la reutilización del agua armoniza las normativas nacionales y, al simplificar las normas, debería facilitar el uso de aguas residuales regeneradas. Se han fijado objetivos de 1 700 millones m³ a 6 600 millones m³. Esta legislación pretende que el uso de aguas residuales depuradas para regar los cultivos sea seguro, transparente y accesible para los agricultores. El texto completo del Reglamento está disponible aquí: [Reglamento de requisitos mínimos para la reutilización del agua \(Reglamento \(UE\)2020/741\)](#).

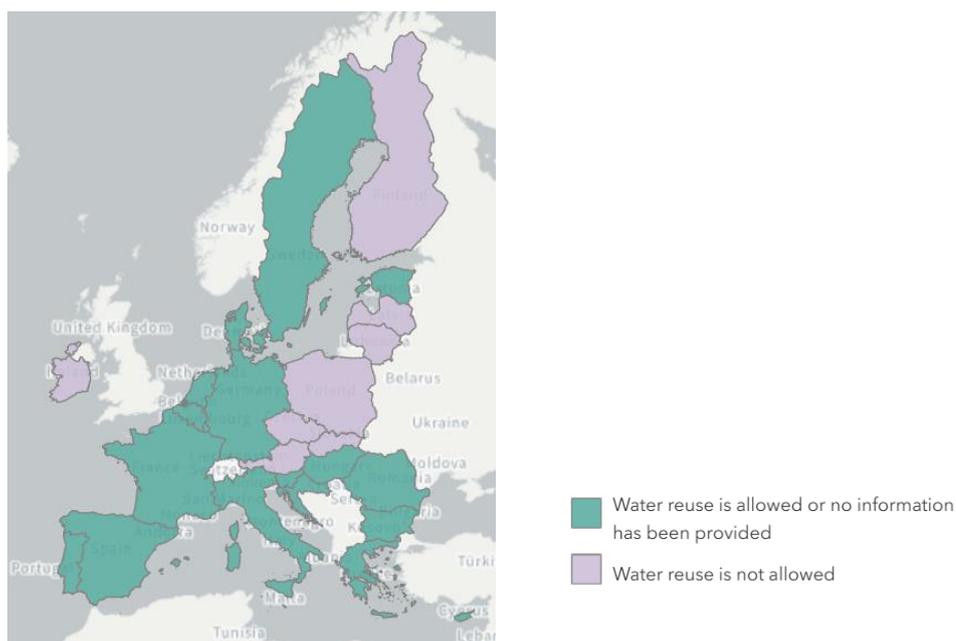


Figura 23. Estados miembros europeos en los que se permite o no la reutilización del agua para el riego agrícola²⁴ (última actualización: 14 de octubre de 2024)

El Reglamento de requisitos mínimos para la reutilización del agua es aplicable a partir del 26 de junio de 2023. El Reglamento establece lo siguiente:

- ✓ Requisitos mínimos de calidad del agua en la Unión Europea para la reutilización segura de las aguas residuales urbanas depuradas en el riego agrícola.
- ✓ Requisitos mínimos de control armonizados, en particular la frecuencia de control de cada parámetro de calidad del agua y los requisitos de control de validación.
- ✓ Disposiciones de gestión de riesgos para evaluar y abordar posibles riesgos adicionales para la salud humana y animal, y posibles riesgos medioambientales.
- ✓ Requisitos de autorización para producir y suministrar agua regenerada.
- ✓ Transparencia, por la que se pone a disposición del público información esencial sobre cualquier proyecto de reutilización del agua.

La legislación europea define cuatro categorías de calidad del agua (A, B, C, D)²⁵ que pueden emplearse en función del tipo de cultivo (alimentario, transformado, industrial) y del tipo de distribución del agua (con o sin contacto con el cultivo). Se requiere calidad C con riego por goteo para las vides, dependiendo del emplazamiento.

3.2.2 Impactos agronómicos

El análisis de los riesgos asociados a la recogida de agua y las medidas preventivas aplicadas permiten reducir considerablemente los posibles problemas de contaminación. Los flujos de metales pesados observados en las dos estaciones piloto estudiadas en el sur de Francia se ajustan a las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud para el agua de riego. Por ejemplo, en el caso del zinc y el cobre, el caudal fue de 100 a 1000 veces inferior a la norma de

esparcimiento de lodos procedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales, con un aporte de 80 mm a 100 mm anuales acumulados durante 10 años.

En lo que respecta a las moléculas de medicamentos, los riesgos en la producción de vino, sin contacto entre el agua y la vendimia, son muy bajos o inexistentes. El seguimiento de algunas moléculas en la uva y el vino no ha mostrado contaminación alguna en los centros piloto estudiados en Francia.

El impacto de las aguas residuales regeneradas en la vida microbiana del suelo es una de las principales preocupaciones. Diferentes trabajos sugieren que en los suelos regados con aguas residuales regeneradas, la composición y el ensamblaje de la microbiota del suelo se ven alterados principalmente debido a los cambios en la química del suelo y la fisiología de las plantas causados por la aplicación de las aguas residuales regeneradas^{26; 27}.

En cuanto al aporte de fertilizantes, la tabla 1 muestra los datos de aporte de nutrientes basados en el aporte de las aguas residuales regeneradas en dos viñedos experimentales del sur de Francia. En cuanto al nitrógeno, hay una proporción de 1:10 entre los dos sitios. El agua del sitio uno puede aportar hasta 40 UF/ha de nitrógeno, mientras que las cantidades del sitio dos son insignificantes. Los aportes de fósforo son insignificantes en ambos casos, lo cual es satisfactorio, ya que los suelos vitícolas siempre están suficientemente abastecidos de este elemento. En cuanto al potasio, el máximo de 30 UF/ha aplicado corresponde a la fertilización de mantenimiento²⁸. Estas aportaciones son un aspecto positivo de la tecnología de reutilización de aguas residuales, pero hay que tener en cuenta algunos puntos:

- ✓ El periodo de riego al final del ciclo de la vid no coincide con el momento óptimo para aplicar nitrógeno. Resulta esencial vigilar el riesgo de transferencia durante las lluvias otoñales, en función del suelo.
- ✓ Para algunas parcelas muy vigorosas, un aporte de 40 UF/ha puede ser excesivo: ¿cómo gestionar la diferencia de necesidades entre parcelas?
- ✓ En cuanto al potasio, hay que tener cuidado con el riesgo de desequilibrio en la relación K/Mg.

Tabla 1. Datos sobre la aportación de nutrientes, basados en la aportación de aguas residuales regeneradas en dos viñedos experimentales del sur de Francia²⁸

| Cantidad anual de agua por ha | | Macronutrientes aportados (kg/ha) y porcentajes en relación con las necesidades anuales | | | | | |
|-------------------------------|------|---|-----|----|-----------------|------|----|
| (m ³) | (mm) | Emplazamiento 1 | | | Emplazamiento 2 | | |
| | | N | P | K | N | P | K |
| 300 | 30 | 13 | 0,3 | 9 | 0,7 | 0,04 | 8 |
| 500 | 50 | 21 | 0,6 | 15 | 1,1 | 0,07 | 14 |
| 750 | 75 | 32 | 0,9 | 23 | 1,7 | 0,11 | 21 |
| 1000 | 100 | 42 | 1,1 | 30 | 2,2 | 0,14 | 28 |

En conclusión, el despliegue de las aguas residuales regeneradas hasta la fecha depende de los cambios en la normativa y del aumento de la demanda de agua agrícola en relación con otros

usos. El elevado coste que supone la inversión en tratamientos adicionales para un periodo de uso limitado (dos meses en el caso de la viticultura) hace que deba fomentarse un enfoque de proyectos multiuso asociados a otras necesidades (limpieza urbana, protección contra incendios, espacios verdes, cultivos diferentes, etc.). Cualquier proyecto nuevo debe considerar un análisis del ciclo de vida en comparación con un suministro de agua más convencional. En algunos casos, la reutilización puede no ser tan buena idea como parece.

4 CALIDAD DEL AGUA DE RIEGO

En el riego, la calidad química del agua puede afectar a la salud de las plantas, a su longevidad y a la eficacia del sistema instalado, sobre todo en el riego subterráneo. Para la fertirrigación, cada uso debe ir precedido de la humectación de las tuberías y el aclarado con agua clara durante una o dos horas para evitar la acumulación de depósitos que pudieran provocar obturaciones. En invierno, todas las tuberías deben vaciarse por completo para evitar el riesgo de congelación o la proliferación de algas. El uso de agua de riego contaminada afectó negativamente a algunas explotaciones agrícolas del distrito de Ayaş, en la región de Anatolia Central (Turquía), lo que reveló una uniformidad de distribución (DU) del 63-91 %, lo que indica una posible obstrucción de los emisores, con la consiguiente descarga poco uniforme procedente de ellos. Esto, a su vez, conllevaba unos requisitos de presión elevados y, por consiguiente, un alto coste del riego²⁹. La gestión del riesgo, sobre todo de obstrucción, ayuda a limitar los costes de mantenimiento del sistema.

Además, el uso de agua de baja calidad, como las aguas residuales recuperadas y reutilizadas para el riego, puede acarrear diversos problemas, como toxicidad para los cultivos, daños a la calidad del suelo, difusión de parásitos e inconvenientes en los sistemas de riego. Por consiguiente, existen distintas clasificaciones de la calidad del agua para evaluar su calidad y su aptitud para el riego. La más utilizada es la clasificación de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación)³⁰, en la que los problemas relativos a la calidad del agua en la agricultura de regadío se subdividen en cuatro grupos relacionados con lo siguiente:

- Salinidad: las sales del suelo o del agua reducen la disponibilidad de agua para el cultivo hasta tal punto que el rendimiento se ve afectado.
- Velocidad de infiltración del agua: un contenido relativamente alto de sodio o bajo de calcio en el suelo o en el agua reduce la velocidad a la que el agua de riego entra en el suelo hasta tal punto que no se puede infiltrar suficiente agua para abastecer de forma adecuada al cultivo desde un riego al siguiente.
- Toxicidad iónica específica: ciertos iones (por ejemplo, sodio, cloruro o boro) del suelo o del agua pueden acumularse en un cultivo sensible hasta concentraciones lo suficientemente altas para causar daños en el cultivo y reducir el rendimiento.
- Varios: el exceso de nutrientes reduce el rendimiento o la calidad, los depósitos antiestéticos en la fruta o el follaje reducen la comerciabilidad, y la corrosión excesiva de los equipos aumenta el mantenimiento y las reparaciones.

En el marco del proyecto [ACCBAT](#), se desarrolló una herramienta de calidad del agua de riego (IWQT) que los agricultores de Jordania, Túnez y Líbano pueden usar con facilidad para maximizar el uso de aguas residuales tratadas y aguas salobres desalinizadas con fines de riego. Se identificaron los parámetros más significativos y económicos de la calidad del agua de riego y se agruparon en tres clases de calidad en función de sus efectos sobre i) el rendimiento de los cultivos y la fertilidad del suelo (indicadores de calidad agronómica), ii) la salud humana (indicadores de calidad higiénica y sanitaria, iii) los sistemas de riego (indicadores de calidad de gestión). La lista de parámetros IWQT y sus umbrales de calidad figuran en la tabla 2.

Tabla 2. Lista de parámetros utilizados en la herramienta de calidad del agua de riego (IWQT) y sus umbrales de calidad³¹

| Parámetros | Unidad de medida | Adecuado para el riego | Advertencia | Restricciones extremas |
|------------------------|--|------------------------|------------------------|------------------------|
| pH | | 6,00–8,00 | 5,00–5,99 8,01–9,00 | <5,00 >9,00 |
| EC | dS m ⁻¹ | <0,70 | 0,70–6,50 | >6,50 |
| SAR | | <3,00 | 3,00–9,00 | >9,00 |
| E. Coli | Número medio por 100 mL | <1000 | | >1000 |
| Nematodos intestinales | Número de media aritmética de huevos L ⁻¹ | <1 | | >1 |
| TSS | mg L ⁻¹ | <200 | 200-400 | >400 |
| HCO3 | mg L ⁻¹ | <150 | 150–300 | >300 |
| Fe | mg L ⁻¹ | <0,50 | 0,50–1,50 | >1,50 |
| Mn | mg L ⁻¹ | <0,10 | 0,10–1,50 | >1,50 |
| H2S | mg L ⁻¹ | <0,50 | 0,50–2,00 | >2,00 |

El IWQT ofrece una serie de [recomendaciones](#) que tienen como objeto orientar a los agricultores sobre el uso del agua de riego de baja calidad clasificada en los umbrales de calidad como ADVERTENCIA.