



SIRERA: innovación para una gestión inteligente y sostenible del agua de riego

Tormos Fibla, I.¹; Zuriaga Agustí, E.¹; Piñuela García, F.²; Clemente Lloscos, M.²; García García, L.²; Chiva Vicent, S.³; Fernández Crespo, E.³; Tasa Candela, M.⁴; Guerra Alcázar, D.⁴; Pérez Pérez, J.G.⁴; Castro, León, J.⁵; Morán Marco, J.⁵; Jorro Ripoll, J.⁶

¹ Sociedad Fomento Agrícola Castellonense, S.A.U (FACSA), Avda Castell Vell, 35, 12004 Castelló de la Plana, España.

² Digital Technologies S.L. (Nealis Tech), Avda del Mar

³ Universitat Jaume I de Castelló (UJI)

⁴ Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA)

⁵ La Unió Llauradora i Ramadera (La Unió)

⁶ Enrevall Investments S.L. (Heliotec)

Email: itormos@facsa.com

I. RESUMEN

La agricultura mediterránea afronta importantes desafíos derivados de la escasez de recursos hídricos, el incremento de los costes energéticos y los efectos cada vez más evidentes del cambio climático. En este contexto, la reutilización de aguas regeneradas se presenta como una alternativa estratégica para aumentar la disponibilidad de recursos hídricos y garantizar la sostenibilidad del regadío. La Comunitat Valenciana, donde el sector agrícola consume aproximadamente el 80 % del agua utilizada y dispone de una amplia red de infraestructuras de depuración, constituye un escenario idóneo para el desarrollo de soluciones innovadoras basadas en la economía circular.

Con el objetivo de afrontar estos retos nace el proyecto SIRERA (Sistema Inteligente para la optimización de la gestión del agua de RiEgo a través de la Reutilización, la digitalización y la eficiencia energética), una iniciativa de I+D+i liderada por FACSA y desarrollada junto a la Universitat Jaume I de Castelló (UJI), el Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA), La Unió Llauradora i Ramadera (La Unió), Digital Technologies S.L. (Nealis Tech) y Enrevall Investments S.L. (Heliotec). El proyecto pretende desarrollar y validar un modelo innovador de gestión agrícola basado en el uso seguro de agua regenerada, la monitorización en tiempo real de los sistemas de riego y la integración de energías renovables para reducir la huella hídrica y energética de la actividad agraria.

SIRERA combina tecnologías avanzadas de tratamiento y control de calidad del agua, sistemas de sensorización, plataformas de análisis de datos, algoritmos de inteligencia artificial, riego por goteo subterráneo y generación fotovoltaica distribuida con el objetivo final de demostrar la viabilidad de un modelo de agricultura inteligente capaz de optimizar el consumo de agua y energía, garantizar la calidad del agua regenerada y aumentar la resiliencia del sector agrícola frente a escenarios de escasez hídrica.

II. PALABRAS CLAVE

Reutilización, Inteligencia Artificial, Fertirrigación, Eficiencia Energética, Sostenibilidad

III. INTRODUCCIÓN

La gestión sostenible del agua constituye uno de los principales desafíos a los que se enfrenta actualmente el sector agrícola. La combinación del crecimiento de la demanda de recursos hídricos, el aumento de las temperaturas y la reducción progresiva de la disponibilidad de agua dulce obliga a buscar nuevas estrategias que permitan mantener la productividad agrícola sin comprometer los recursos naturales.

La Comunitat Valenciana es una de las regiones españolas con mayor peso del regadío. Aproximadamente el 45,7 % de la superficie cultivada dispone de sistemas de riego y más de 1.280 hm³ de agua al año son destinados a usos agrícolas. Esta situación hace que la disponibilidad de agua sea un factor crítico para la competitividad y sostenibilidad de las explotaciones agrarias valencianas.

La reutilización de aguas regeneradas procedentes de estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) representa una oportunidad para incrementar la seguridad hídrica del territorio. Sin embargo, su implantación generalizada continúa encontrando barreras relacionadas con la calidad del agua, la presencia de contaminantes emergentes, la necesidad de cumplir requisitos regulatorios cada vez más estrictos y la percepción de riesgo por parte de los usuarios finales.

Paralelamente, la digitalización está transformando progresivamente la gestión agrícola mediante la incorporación de sensores, plataformas de análisis de datos e inteligencia artificial capaces de optimizar las decisiones de riego y fertilización. Del mismo modo, la integración de energías renovables ofrece nuevas oportunidades para reducir el impacto económico y ambiental asociado al consumo energético de los sistemas de riego.

En este contexto, el proyecto SIRERA plantea una solución integral que combina reutilización de agua, digitalización y eficiencia energética para desarrollar un modelo de regadío inteligente que contribuya a la sostenibilidad de la agricultura mediterránea.

IV. METODOLOGÍA

La estrategia de trabajo desarrollada en SIRERA se basa en la integración de varias tecnologías innovadoras dentro de una infraestructura agrícola demostrativa capaz de reproducir condiciones reales de explotación.

En primer lugar, el proyecto aborda la reutilización de aguas regeneradas procedentes de EDAR para su aplicación en riego agrícola. Para ello se implementan sistemas de monitorización avanzados destinados a garantizar la calidad del agua reutilizada y evaluar parámetros físico-químicos, microbiológicos y la presencia de contaminantes emergentes, tales como residuos farmacéuticos, pesticidas y genes de resistencia a antibióticos. Esta monitorización continua permite asegurar el cumplimiento de los estándares de calidad exigidos (Real Decreto 1085/2024 y Reglamento europeo (UE) 2020/741) para el uso agrícola del agua regenerada.



Figura 1.- Detalle parcela experimental de cítricos donde se desarrolla el proyecto SIRERA

De forma complementaria, se estudian tecnologías auxiliares orientadas a mejorar las características del agua antes de su aplicación al cultivo. Entre ellas destaca la incorporación controlada de oxígeno activo mediante H_2O_2 (100 ppm) para reducir riesgos de obturación, mejorar la calidad del agua y favorecer el adecuado funcionamiento de las instalaciones de riego.

Otro de los elementos clave de la metodología es la implantación de sistemas de riego por goteo subterráneo. Esta tecnología permite suministrar el agua directamente a la zona radicular de las plantas, reduciendo las pérdidas por evaporación y aumentando la eficiencia hídrica del sistema. Paralelamente, se evalúa el comportamiento agronómico de los cultivos irrigados con agua regenerada bajo diferentes condiciones operativas.



*Figura 2.- Detalle de la zanjadora utilizada para enterrar la tubería del sistema de riego subterráneo (izquierda).
Detalle de la ubicación en el suelo de la tubería enterrada (derecha).*

La digitalización constituye otro de los pilares fundamentales del proyecto. Para ello se despliega una red de sensores capaces de monitorizar de forma continua variables relacionadas con la humedad del suelo, calidad del agua, necesidades del cultivo, climatología y funcionamiento hidráulico de la instalación. La información generada se integra en una plataforma inteligente que utiliza herramientas de análisis de datos y algoritmos de inteligencia artificial para optimizar automáticamente la gestión del riego y la fertirrigación.



Figura 3.- Instalación de sondas de humedad para el monitoreo continuo de la humedad del suelo

Finalmente, SIRERA incorpora soluciones de generación renovable mediante la instalación de sistemas fotovoltaicos asociados a la infraestructura agrícola. El objetivo es reducir el consumo energético procedente de fuentes convencionales y mejorar la sostenibilidad global del sistema de riego.

V. RESULTADOS

Con objeto de validar las soluciones desarrolladas en condiciones reales de explotación, el proyecto ha contemplado el diseño, construcción e instalación de un piloto demostrativo en la Comunidad de Regantes de Vila-real (Castellón), una localización especialmente representativa debido a la importancia del cultivo de cítricos y al interés creciente por el uso de recursos hídricos alternativos en la zona. El piloto utiliza agua regenerada procedente de la estación depuradora OBVA (Onda–Betxí–Vila-real–Alquerías) y constituye una infraestructura experimental a escala preindustrial donde se evalúan de forma integrada las diferentes tecnologías desarrolladas en el marco de SIRERA.



Figura 4.- Balsa Comunidad de Regantes de Vila-real

Aunque el proyecto continúa actualmente en desarrollo, los primeros resultados obtenidos permiten constatar el potencial de las tecnologías evaluadas para mejorar la gestión del agua regenerada en agricultura.



Figura 5.- Planta piloto SIRERA

Uno de los avances más relevantes ha sido la puesta en funcionamiento de sistemas de monitorización continua capaces de evaluar en tiempo real la calidad del agua regenerada, el comportamiento del suelo y la respuesta de los cultivos. Esta capacidad de control permite una gestión mucho más precisa y segura del recurso hídrico, facilitando además la detección temprana de posibles incidencias operativas.

Los ensayos realizados han demostrado la viabilidad de tecnologías destinadas a mejorar la calidad del agua reutilizada antes de su aplicación agrícola. En particular, la incorporación controlada de oxígeno activo ha mostrado resultados prometedores para minimizar problemas de obturación en goteros y favorecer el desarrollo radicular de los cultivos. Para ello, fue necesario el desarrollo y validación de los protocolos de aplicación del H_2O_2 , con el fin de asegurar una dosificación eficaz, reproducible y compatible con las condiciones reales de riego de la parcela experimental.

Para la definición de la dosis inicial de H_2O_2 , se tomó como referencia un estudio científico previo realizado en cítricos (Robles et al., 2026), en el que se evaluó la aplicación de oxifertirrigación en la variedad 'Ortanique' y se demostró su eficacia para incrementar el contenido de oxígeno disuelto en el agua de riego sin generar efectos adversos sobre el cultivo. Esta base científica permitió establecer una dosis de partida técnicamente fundamentada y coherente con los objetivos del proyecto SIRERA.

En una primera fase, se llevaron a cabo ensayos a nivel de laboratorio, en los que se tomaron muestras de agua de riego y se evaluó el efecto de una dosis conocida de H_2O_2 (100 ppm) sobre el contenido de oxígeno disuelto. El seguimiento temporal realizado permitió corroborar que la dosis seleccionada produce un incremento efectivo del oxígeno disuelto en el agua, validando así su potencial como herramienta de oxigenación en el sistema de riego.

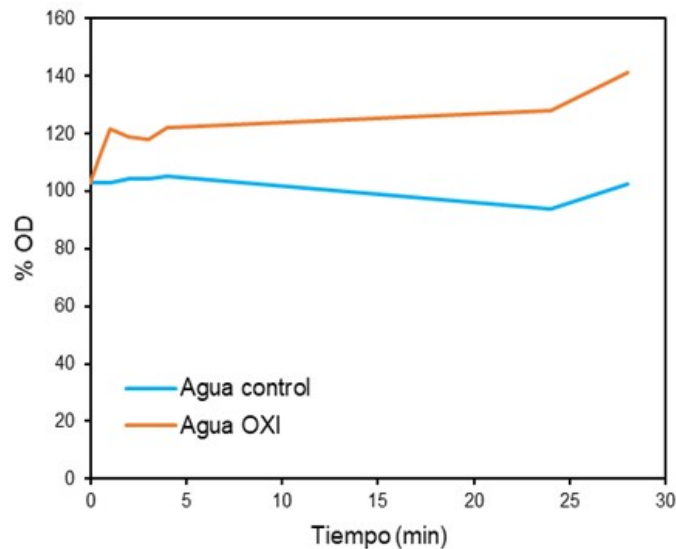


Figura 6.- Evolución tiempo(minutos) del porcentaje de oxígeno disuelto (%OD) en el agua control (sin aplicación de peróxido de hidrógeno (H_2O_2)) y agua OXI (con 100 ppm de H_2O_2).

Posteriormente, la aplicación se trasladó a condiciones de campo. A nivel operativo, se está utilizando un formulado comercial de H_2O_2 con una riqueza del 50%, aplicado mediante los sistemas de inyección instalados en el cabezal de riego. El sistema se ha configurado para que la inyección de peróxido se realice de forma continua durante toda la duración del riego (en ambos sistemas de riego: superficial y subterráneo), garantizando una distribución homogénea del producto en el sistema.

Los efluentes de las estaciones de tratamiento de las aguas residuales urbanas presentan niveles bajos de oxígeno disuelto ocasionados por los propios procesos de depuración. Esto supone un problema si estas aguas residuales pretenden ser utilizadas para el riego de cultivos. En este sentido, para la correcta implementación de un sistema de oxifertirrigación aplicado a cítricos, basado en la reutilización de aguas residuales urbanas, deben tenerse en cuenta diversos factores. En primer lugar, comprender el efecto agronómico que tiene el incremento del oxígeno disuelto en el agua de riego (tanto si se utiliza agua residual urbana, agua regenerada o agua de la balsa) a partir de inyección de H_2O_2 y, en segundo lugar, evaluar el potencial del H_2O_2 en aguas regeneradas (tras el proceso de ultrafiltración) como elemento desinfectante.

Para ello se evaluó el efecto de la adición de diferentes dosis de H_2O_2 sobre agua residual urbana y sobre agua regenerada mediante ultrafiltración. Los resultados mostraron que la adición de diferentes concentraciones de H_2O_2 sobre agua residual urbana o sobre agua regenerada no tiene efectos significativos sobre el pH o la conductividad eléctrica. Sin embargo, sí que se observaron cambios si nos fijamos en la concentración de oxígeno disuelto en los diferentes tratamientos.

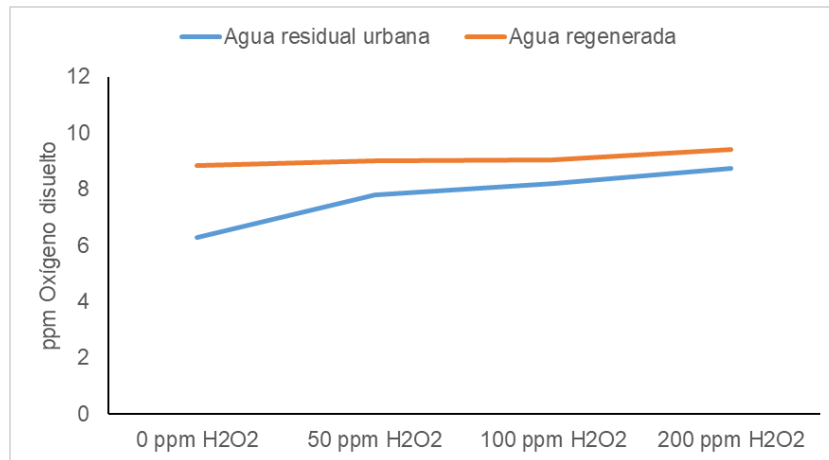


Figura 7.- Concentración de oxígeno disuelto en agua residual urbana y agua regenerada tras la adición de diferentes concentraciones de H₂O₂

Por lo que respecta a la capacidad desinfectante de este reactivo sobre los diferentes tipos de agua, indicar que las concentraciones estudiadas de H₂O₂, no tienen un efecto de desinfección sobre aguas de salida de la EDAR, ya que estas no han sido sometidas a un proceso de desinfección previo. Si observamos el efecto en el agua regenerada, en las placas de cultivo sí que se observa un efecto de reducción de la carga bacteriana debido a la ultrafiltración del agua de salida de la EDAR, pero no se observan diferencias en cuanto al nivel de unidades formadoras de colonia (UFC) entre las diferentes dosis de H₂O₂ aplicadas.

Actualmente se está trabajando en la optimización de las dosis aplicadas a campo para encontrar la dosis óptima de H₂O₂ que permita alcanzar los 3 objetivos buscados: oxigenar, desinfectar y limpiar. Asimismo, se han obtenido resultados positivos en la implementación del riego por goteo subterráneo, una solución que permite optimizar el uso del agua al reducir las pérdidas por evaporación y mejorar la uniformidad de aplicación.

Se instalaron sensores multiparamétricos de humedad, conductividad eléctrica aparente y temperatura del suelo (modelo TEROS-12) en la parcela experimental en los distintos sectores de riego, cubriendo tanto los sistemas de riego superficial como subterráneo, y permitiendo un seguimiento representativo de la dinámica del agua y de las sales en el perfil del suelo a lo largo del ciclo de cultivo. La información generada por estos sensores ha sido utilizada como herramienta clave para la verificación y ajuste de la programación del riego, permitiendo contrastar las dosis aplicadas con la respuesta real del suelo y del cultivo. De forma complementaria, la programación del riego se ha realizado siguiendo las recomendaciones semanales proporcionadas a través de la plataforma RiegosIVIA, utilizando los datos climáticos y agronómicos específicos de la parcela experimental y consiguiendo, para la anualidad 2025, un ahorro medio del 29 % en la dosis de riego aplicada en el sistema de riego subterráneo respecto al sistema superficial.

La respuesta agronómica del cultivo durante la campaña 2025 se evaluó por parte del grupo del IVIA mediante un seguimiento detallado del estado hídrico y funcional de los árboles, una vez iniciada la programación diferenciada del riego. Para ello, se realizaron medidas periódicas del potencial hídrico de tallo a mediodía (Ψ_{tallo}), empleando una cámara de presión tipo Schölander, así como medidas de intercambio gaseoso y fluorescencia de la clorofila, utilizando un porómetro/fluorímetro avanzado LI-600 (LI-COR). Los resultados obtenidos muestran la

ausencia de diferencias significativas entre sistemas de riego en todos los parámetros evaluados, lo que indica que la programación diferenciada del riego ha sido adecuada y que el ahorro de agua alcanzado con el riego subterráneo (29%) no ha comprometido el estado hídrico ni el funcionamiento fisiológico del cultivo.

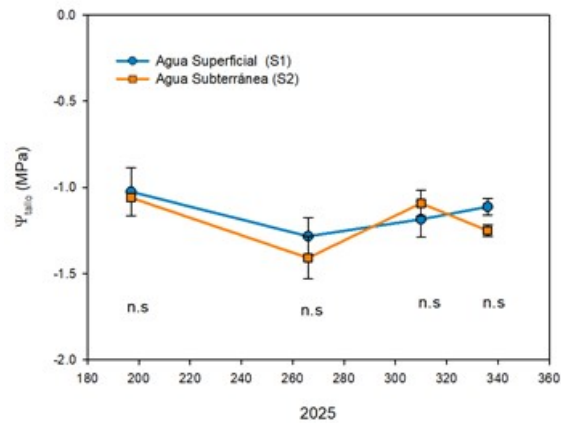


Figura 8.- Evolución del potencial hídrico de tallo (Ψ_{tallos}) en árboles de clementina 'Hernandina' durante la campaña 2025. n.s indica sin diferencias estadísticamente significativas.

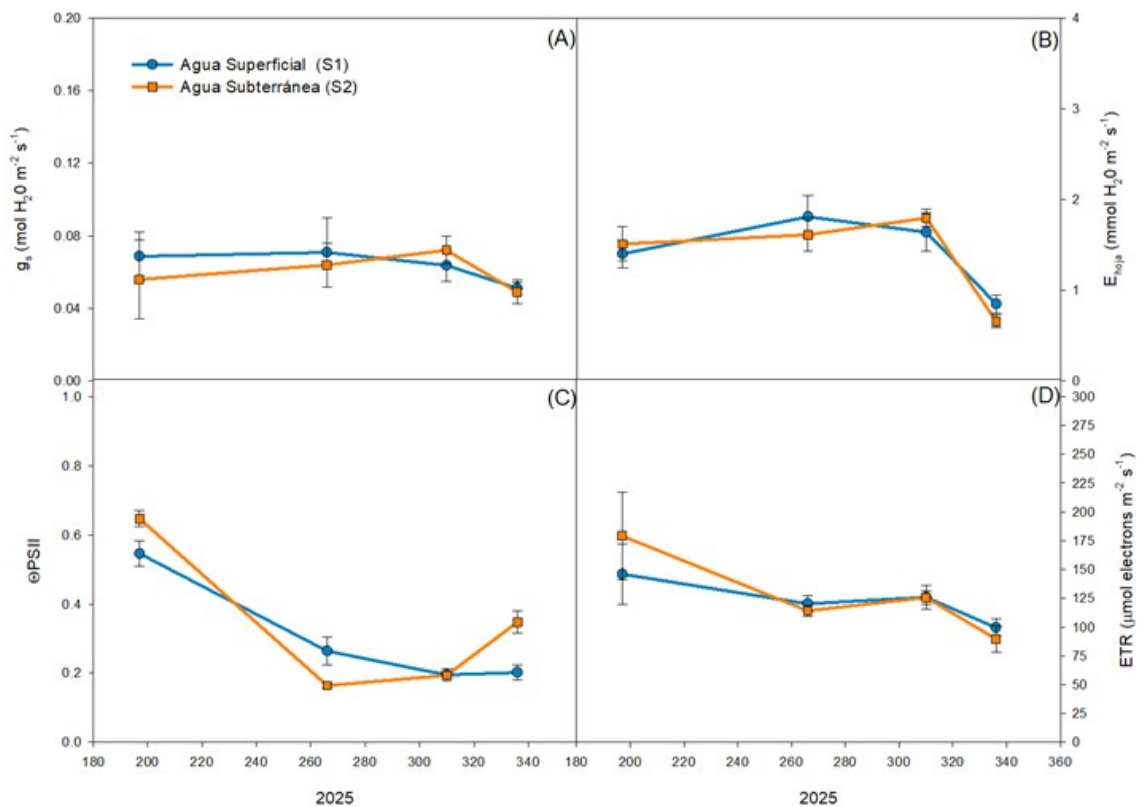


Figura 9.- Evolución de la conductancia estomática (g_s , A), transpiración (E_{hoja} , B) eficiencia fotoquímica del fotosistema II (Φ_{PSII} , C) y tasa de transporte de electrones (ETR, D) en los tratamientos de riego con agua superficial y subterránea, en árboles de clementina 'Hernandina' durante la campaña 2025.

La digitalización del sistema ha permitido avanzar en la automatización de la gestión del riego mediante sensores y herramientas de análisis de datos. La información recopilada está siendo utilizada para alimentar algoritmos inteligentes capaces de ajustar las estrategias de riego y fertirrigación a las necesidades reales de los cultivos, mejorando la eficiencia hídrica y energética de las explotaciones.

Igualmente, se ha iniciado la integración de sistemas fotovoltaicos asociados al sistema de riego, con el objetivo de producir energía renovable y reducir los costes energéticos asociados al uso de agua regenerada. Además de generar electricidad, estas instalaciones podrían contribuir a disminuir la evapotranspiración de los cultivos mediante la creación de zonas de sombra parcial.



Figura 10.- Sistemas fotovoltaicos instalados en la parcela de cultivo

VI. CONCLUSIONES

El proyecto SIRERA representa una apuesta innovadora por la transformación digital y sostenible de la agricultura mediterránea. La combinación de reutilización de agua regenerada, monitorización avanzada, inteligencia artificial y energías renovables permite desarrollar un modelo de gestión agrícola alineado con los principios de la economía circular y la adaptación al cambio climático.

Los resultados obtenidos hasta el momento evidencian que la reutilización de agua regenerada puede constituir una alternativa fiable y segura para incrementar la disponibilidad de recursos hídricos destinados al regadío, siempre que vaya acompañada de tecnologías adecuadas de control y aseguramiento de la calidad. Asimismo, la aplicación de herramientas digitales facilita una gestión más eficiente de los recursos, permitiendo optimizar el consumo de agua, energía y fertilizantes.



La integración de energías renovables y sistemas de riego de alta eficiencia contribuye adicionalmente a reducir la huella ambiental del sector agrícola, favoreciendo la transición hacia modelos productivos más sostenibles y resilientes. En este sentido, SIRERA no solo pretende desarrollar nuevas tecnologías, sino también generar conocimiento transferible que facilite su futura implantación por parte de agricultores, comunidades de regantes y gestores del agua

VII. AGRADECIMIENTOS

Entidades Colaboradoras: Comunidad de Regantes de Vila-real y la Entidad Pública de Saneamiento de Aguas Residuales de la Comunitat Valenciana (EPSAR)

El proyecto SIRERA (Sistema Inteligente para la optimización de la gestión del agua de riego a través de la reutilización, digitalización y eficiencia energética), ha sido financiado por la Unión Europea en el marco del Programa Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) Comunitat Valenciana 2021-2027, a través de la convocatoria de Proyectos Estratégicos en Cooperación de IVACE+i Innovación y cuenta con un presupuesto global de 958.015,43 euros y se desarrolla entre 2024 y 2026.



GENERALITAT
VALENCIANA



Financiado por
la Unión Europea