CONAMA 2026

FIVRA: humedales construidos multietapa para el tratamiento y la reutilización de aguas residuales de bodega

Grupo Operativo FIVRA – Fitodepuración Vitivinícola para la Reutilización del Agua

Edita: Fundación Conama

Año: 2026

Este documento está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional.

Personas autoras de la presente comunicación técnica

Autor Principal de la comunicación: Pietro Castellani. Investigador técnico, responsable de la línea de tratamiento de agua con soluciones basadas en la naturaleza. Fundación CIRCE.

Otros Autores: Maider Gomez Palmero. Responsable de proyecto, Sostenibilidad y Economía Circular. Fundación CIRCE.

Ana Garcia-Belenguer Rubio. Investigadora técnica. Fundación CIRCE.

Rut Calvo Bosque. Líder equipo Sostenibilidad. Fundación CIRCE.

Índice

1. Introducción 1

1.1. Los humedales construidos como alternativa 2

2. El Grupo Operativo FIVRA 2

3. Objetivos 3

4. Metodología 4

4.1. Caracterización de efluentes 4

4.2. Diseño del sistema piloto 4

4.3. Reutilización del agua y tratamientos de afino 5

4.4. Evaluación ambiental y económica 6

4.5. Herramienta de predimensionamiento y transferencia 6

5. Resultados 6

5.1. Resultados de la primera anualidad 6

5.2. Estimación preliminar del desempeño ambiental y económico 7

5.3. Resultados esperados 7

6. Conclusiones 8

7. Agradecimientos 8

8. Bibliografía 8

1. Introducción

La producción vitivinícola, tradicionalmente percibida como una actividad de bajo impacto ambiental, genera considerables volúmenes de efluentes con elevadas cargas contaminantes. Los volúmenes de aguas residuales y las cargas orgánicas varían significativamente en función del período de vendimia, las tecnologías de vinificación implementadas y la escala productiva de las instalaciones, oscilando entre 1 y 8 litros por cada litro de vino producido (Marzo et al., 2025). La producción de vino en Aragón en 2025 superó los 729.000 hectolitros, lo que generó aproximadamente 1,5 millones de hectolitros de aguas residuales (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación [MAPA], 2026).

Hasta el 80% del consumo total de agua de una bodega se convierte en aguas residuales (Charles et al., 2026). Su elevada carga orgánica, su acidez y la presencia de polifenoles y compuestos recalcitrantes los convierten en efluentes de tratamiento complejo. A esto se añade una marcada variabilidad estacional: hasta el 80% del volumen total de agua residual se genera en pocas semanas, coincidiendo con el período de vendimia, lo que exige sistemas capaces de gestionar picos de carga elevados y de adaptarse a períodos de escaso caudal sin comprometer la calidad del efluente.

La gestión actual de estos efluentes en bodegas de pequeño y mediano tamaño se basa principalmente en un pretratamiento en la propia instalación seguido del vertido a la red de saneamiento municipal, en sistemas de fangos activados o en la gestión por terceros. Los sistemas de fangos activados presentan limitaciones estructurales significativas para estas instalaciones: el elevado consumo energético derivado de la aireación continua, la generación de lodos de depuración que requieren gestión externa con costes recurrentes, la necesidad de operadores cualificados y la dificultad para adaptarse a las variaciones estacionales de carga. En la mayor parte de los casos, además, el agua tratada se descarga a la red de saneamiento, renunciando a su valor como recurso hídrico recuperable.

La presión regulatoria refuerza la urgencia del cambio hacia soluciones más sostenibles. La Confederación Hidrográfica del Ebro aplica criterios de vertido cada vez más exigentes en las zonas vulnerables a la contaminación por nutrientes del territorio aragonés, lo que incrementa los costes de cumplimiento normativo para las bodegas. Paralelamente, el Reglamento (UE) 2020/741 y el Real Decreto 1085/2024 establecen un marco específico para la reutilización de aguas regeneradas. Este marco abre una oportunidad estratégica para transformar el agua residual en un recurso, pero introduce también requisitos estrictos de calidad y gestión del riesgo que actualmente limitan su adopción en el sector.

1.1. Los humedales construidos como alternativa

Los humedales construidos son sistemas de tratamiento basados en la naturaleza que emplean plantas macrófitas, sustratos filtrantes y comunidades microbianas para eliminar contaminantes mediante procesos físicos, químicos y biológicos. A diferencia de los sistemas convencionales de tratamiento biológico, operan con un consumo energético inferior a 0,5 kWh/m³ tratado, frente a los 2 kWh/m³ de los sistemas de fangos activados, y sin adición de reactivos químicos (Flores et al., 2019). Entre las configuraciones más comunes se encuentran los humedales de flujo subsuperficial horizontal, los de flujo vertical y los sistemas híbridos, siendo estos últimos especialmente eficaces para gestionar la elevada variabilidad de carga característica de los efluentes vitivinícolas (Latessa et al., 2023).

Existen aplicaciones a escala real en el contexto europeo, entre las que destacan el proyecto WETWINE, desarrollado en una bodega gallega (Pascual et al., 2021), y una experiencia de larga duración en la bodega Cecchi, en Italia (Rizzo et al., 2020). Estas aplicaciones han demostrado eficiencias de eliminación de DQO entre el 77% y el 99%, dependiendo del diseño y las condiciones operativas, y han validado la posibilidad de reutilizar el agua tratada para riego agrícola (Marzo et al., 2025). En España, experiencias a escala real con configuraciones similares a la propuesta en FIVRA han confirmado eficiencias de eliminación de DQO y SST superiores al 93% tras dos años de monitorización continua (Pascual et al., 2021).

Sin embargo, la literatura destaca que muchas investigaciones se basan en ensayos de laboratorio o en aguas sintéticas, y persisten lagunas relevantes: la comparación sistemática entre configuraciones de humedales en condiciones reales, el desarrollo de criterios de diseño específicos para pequeñas y medianas bodegas, y la evaluación comparativa frente a tecnologías convencionales en términos de eficiencia, costes y sostenibilidad. A ello se suma que la mayor parte de las experiencias documentadas se limita a la depuración para vertido o a la reutilización en riego agrícola. Estas lagunas constituyen la principal justificación técnica de FIVRA.

2. El Grupo Operativo FIVRA

FIVRA (Fitodepuración Vitivinícola para la Reutilización del Agua) es un Grupo Operativo de la Asociación Europea para la Innovación en materia de productividad y sostenibilidad agrícolas (AEI-AGRI), cofinanciado por el Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (FEADER) en el marco del Plan Estratégico de la PAC 2023-2027. El proyecto se desarrolla entre agosto de 2026 y noviembre de 2029 en las comarcas de Campo de Borja y Campo de Cariñena, dos territorios con una economía fuertemente vinculada al sector vitivinícola, una acusada tendencia a la despoblación y una relación directa con varios espacios de la Red Natura 2000.

El grupo combina experiencia técnica, capacidad industrial y conexión con el entorno productor rural. Su composición, que reúne una cooperativa de gran base social y una bodega familiar de

producción propia con proyección internacional, permite que los resultados sean aplicables a los dos modelos empresariales dominantes en el sector vitivinícola aragonés (Cuadro 1).

Cuadro 1. Composición del Grupo Operativo FIVRA.

Entidad	Tipo de participación	Papel en el proyecto
Cooperativa del Campo San Juan Bautista de Fuendejalón (D.O. Campo de Borja)	Beneficiario	Bodega anfitriona del sistema piloto: caracterización de efluentes, construcción, operación y muestreo.
Bodegas Luis Marín Pardos S.L. (D.O.P. Cariñena)	Beneficiario	Caracterización de efluentes y caso de estudio para la replicabilidad.
Clúster de Maquinaria Agrícola de Aragón (CAMPAG)	Beneficiario	Coordinación de la divulgación y colaboración en el estudio de replicabilidad.
Fundación CIRCE	Centro tecnológico, coordinador	Diseño y seguimiento científico del piloto, estudio de afino, ACV y LCC, herramienta de predimensionamiento.
Cooperativa Comarcal del Campo Virgen de la Corona (COVICO)	Miembro no beneficiario	Difusión y caso de replicabilidad en un contexto productivo multisectorial.

3. Objetivos

El objetivo principal de FIVRA es validar un sistema innovador de fitodepuración basado en humedales construidos para el tratamiento y la reutilización de las aguas residuales del sector vitivinícola, demostrando su viabilidad técnica, ambiental y económica en condiciones reales de operación. Para ello, el proyecto aborda de manera integral el reto de la gestión sostenible del agua en bodegas, mediante el diseño, construcción y operación de un sistema piloto multietapa alimentado con efluentes reales y sometido a la variabilidad estacional del ciclo productivo.

A su vez, el proyecto tiene como finalidad avanzar hacia el cierre del ciclo hídrico en bodega, evaluando el potencial de reutilización del agua tratada tanto para usos agrícolas como para su reintegración en procesos internos, en cumplimiento con el Reglamento (UE) 2020/741 y el RD 1085/2024. Como resultado, FIVRA no solo valida una tecnología basada en la naturaleza adaptada a las condiciones del sector vitivinícola aragonés, sino que también desarrolla herramientas prácticas para su implementación. Los objetivos específicos son los siguientes:

- **Caracterización de efluentes vitivinícolas:** definir las condiciones reales de diseño a partir de la caracterización de los efluentes de las bodegas participantes.
- **Diseño, construcción y operación del sistema piloto:** validar la eficacia del sistema multietapa en condiciones reales durante dos campañas de vendimia.
- **Predimensionamiento personalizado:** dimensionar un sistema a escala real adaptado a cada bodega participante, con estimación de costes de inversión y operación.

- **Evaluación comparativa con sistemas convencionales:** cuantificar, mediante ACV y LCC, el desempeño ambiental y económico del sistema frente a los fangos activados.
- **Reutilización y estudio de afino:** definir escenarios de reutilización viables y validar tratamientos de afino para usos internos en bodega.
- **Herramienta de predimensionamiento:** desarrollar un instrumento de apoyo a la decisión transferible al sector.
- **Transferencia y adopción sectorial:** difundir los resultados y facilitar la replicación de la solución en otras bodegas y sectores agroalimentarios.

4. Metodología

4.1. Caracterización de efluentes

CIRCE elaboró el plan de caracterización de los efluentes de la Cooperativa San Juan Bautista, que establece el protocolo de muestreo y análisis, los puntos de muestreo y los parámetros fisicoquímicos a determinar: DQO, DBO_5, temperatura, pH, sólidos en suspensión totales, sólidos sedimentables, nitrógeno total, nitrógeno amoniacal, fósforo total y conductividad. La cooperativa colaboró en la definición de la estrategia de muestreo, identificando los periodos de máxima carga contaminante en función de su calendario productivo.

La campaña se realizó en agosto de 2026, con seis jornadas de muestreo, y los análisis se llevaron a cabo en el laboratorio medioambiental de CIRCE. Se concentró el muestreo en el periodo de vendimia, ya que las condiciones de máxima carga y variabilidad son las más determinantes para el dimensionamiento.

4.2. Diseño del sistema piloto

A partir de los resultados de la caracterización se ha dimensionado un sistema piloto con un caudal de diseño de 0,1 m^3/d, compuesto por un humedal construido de tipo francés de dos etapas y flujo vertical, seguido de un humedal de flujo horizontal subsuperficial (Cuadro 2). El sistema opera sin adición de reactivos químicos, se adapta de forma pasiva a la variabilidad estacional del caudal y requiere un mantenimiento mínimo, lo que lo hace especialmente adecuado para instalaciones sin personal técnico especializado en depuración.

El humedal de tipo francés recibe el efluente bruto directamente, sin necesidad de sedimentación primaria previa. Los lechos de cada etapa se alimentan por lotes y se alternan entre fases de alimentación y de reposo. La fracción sólida se acumula en la superficie de la primera etapa bajo condiciones aeróbicas favorecidas por la vegetación de macrófitas, lo que permite su mineralización progresiva in situ y elimina la necesidad de extraer y gestionar lodos externamente. La segunda etapa completa la eliminación de materia orgánica y la nitrificación. El humedal de flujo horizontal, que opera en condiciones anóxicas, favorece la desnitrificación y la eliminación de compuestos orgánicos recalcitrantes.

Cuadro 2. Dimensionamiento preliminar del sistema piloto de FIVRA.

Etapa	Configuración	Superficie	Espesor
Humedal tipo francés, etapa 1	Flujo vertical, 3 lechos en paralelo	3 × 3 m²	0,9 m
Humedal tipo francés, etapa 2	Flujo vertical, 2 lechos en paralelo	2 × 3 m²	0,9 m
Humedal de flujo horizontal subsuperficial	1 lecho	4 m²	0,5 m (zona saturada)

El sistema se ha dimensionado con dos objetivos de calidad. A la salida del humedal de tipo francés, el agua debe alcanzar una calidad adecuada para un eventual vertido directo a la red de saneamiento. A la salida del humedal horizontal, la calidad debe ser adecuada para el vertido a aguas superficiales o para la reutilización agrícola.

La construcción está prevista entre marzo y agosto de 2027, y la operación cubrirá dos ciclos productivos completos, con las vendimias de 2027 y 2028, con muestreo a la entrada y a la salida de cada etapa.

4.3. Reutilización del agua y tratamientos de afino

FIVRA da un paso más respecto a las experiencias documentadas: evalúa las condiciones técnicas y económicas para que el agua regenerada alcance la calidad necesaria para su reutilización en procesos internos de la bodega, conforme a los requisitos del Reglamento (UE) 2020/741 y del RD 1085/2024. El trabajo se organiza en tres fases.

En primer lugar, se comparará la calidad del efluente del sistema piloto y del sistema convencional con los requisitos normativos, identificando los usos potenciales que cada efluente habilita y aquellos que requieren tratamiento adicional. En segundo lugar, se evaluarán tecnologías de afino complementarias al sistema de humedales, analizando para cada una su eficacia en la eliminación de los parámetros limitantes, sus costes de inversión y operación a escala real y su integración técnica con el sistema. Por último, la tecnología seleccionada se validará mediante pruebas experimentales en discontinuo, aplicadas tanto al efluente del piloto como al del sistema convencional.

El objetivo es reutilizar el agua en usos internos de la bodega como la limpieza de equipos sin contacto alimentario, la limpieza de vehículos u otros usos similares. Este enfoque abre la posibilidad real de cerrar el ciclo hídrico dentro de la propia instalación, transformando el agua residual en un recurso recuperado de valor económico para la bodega.

4.4. Evaluación ambiental y económica

FIVRA comparará el sistema de fitodepuración a escala real, estimado por extrapolación de los resultados del piloto, con el sistema de fangos activados en operación en la Cooperativa San Juan Bautista. CIRCE realizará un análisis de ciclo de vida (ACV) conforme a las normas ISO 14040 e ISO 14044. En paralelo, un análisis de costes del ciclo de vida (LCC) cuantificará los costes de capital, operación y mantenimiento de ambos sistemas, incluyendo el valor económico del agua recuperada.

Ambos análisis utilizarán datos reales proporcionados por las bodegas sobre consumos, costes, mantenimiento y generación de residuos, y sus resultados se expresarán por metro cúbico tratado. El objetivo es demostrar que la fitodepuración, con o sin afino, ofrece un menor impacto ambiental y un menor coste que el sistema convencional.

4.5. Herramienta de predimensionamiento y transferencia

Los datos experimentales del piloto y los criterios de diseño validados durante su operación se integrarán en una herramienta de predimensionamiento. A partir del caudal y las características del efluente, la superficie disponible y los objetivos de calidad del agua tratada, la herramienta seleccionará la configuración más adecuada y proporcionará un predimensionamiento preliminar, con una estimación de costes y de beneficios ambientales.

La herramienta se presentará y operará de forma gratuita en las jornadas técnicas abiertas al sector, previstas en las instalaciones de la cooperativa en abril de 2028 y octubre de 2029, en las que otras bodegas y empresas agroalimentarias podrán obtener un predimensionamiento adaptado a sus propios efluentes.

5. Resultados

5.1. Resultados de la primera anualidad

Durante la primera anualidad se ha completado la puesta en marcha del grupo operativo, con la reunión de lanzamiento celebrada en julio de 2026, y la campaña de caracterización del periodo de vendimia. Los resultados confirmaron un efluente de elevada carga orgánica y alta variabilidad, y han permitido completar el dimensionamiento del sistema piloto descrito en el apartado anterior.

5.2. Estimación preliminar del desempeño ambiental y económico

Los estudios disponibles sobre sistemas de humedales a escala real en bodegas permiten anticipar el desempeño esperado frente a los fangos activados (Cuadro 3). Con un coste de inversión comparable, la ventaja económica de la fitodepuración procede de tres factores: la eliminación del consumo de reactivos químicos, la reducción del consumo eléctrico, y la eliminación de los costes recurrentes de transporte y gestión externa de lodos.

Cuadro 3. Comparación preliminar entre fangos activados y fitodepuración en bodegas.

Indicador	Fangos activados	Fitodepuración	Reducción
Coste de inversión (€/m³)	2,58	2,30	11%
Coste de operación (€/m³·año)	0,50	0,04	92%
Coste total a 20 años (€/m³)	12,6	3,1	75%
Consumo energético en vendimia (kWh/m³)	2,0	0,5	75%
Huella de carbono (kg CO_2eq/m³)	4,5	1,2	73%

Fuente: elaboración propia a partir de Flores et al. (2019, 2020) y Valderrama et al. (2012).

Según estas estimaciones, la fitodepuración reduciría la huella de carbono hasta un 73% y el coste total a 20 años hasta un 75% respecto a los fangos activados. Para una bodega que trata 10.000 m³/año de aguas residuales, esto supondría evitar unas 33 t $CO_{2\text{-eq}}$ al año. A estos valores debe añadirse el beneficio económico del agua recuperada para su reutilización, que los sistemas convencionales no permiten capturar. El ACV y el LCC de FIVRA cuantificarán estos valores con datos reales de operación.

5.3. Resultados esperados

Para cada bodega participante, FIVRA entregará una caracterización fisicoquímica de sus efluentes reales, un predimensionamiento personalizado del sistema de fitodepuración, un análisis comparativo ACV y LCC frente al sistema en uso y un informe de viabilidad de la reutilización del agua tratada. En conjunto, esta información permitirá a cada bodega tomar una decisión de inversión informada sobre la implantación de un sistema de tratamiento propio.

Para el sector vitivinícola aragonés, el proyecto generará la primera base de datos experimentales obtenidos con efluentes reales de bodegas de la región a lo largo de dos ciclos productivos, una herramienta de predimensionamiento validada con datos locales y una solución de afino validada para usos internos en bodega. La metodología es transferible además a otros contextos con generación estacional de aguas residuales, como las industrias del aceite de oliva o lácteas, o los núcleos rurales no conectados a la red de saneamiento.

6. Conclusiones

FIVRA aborda un reto común a las pequeñas y medianas bodegas: tratar efluentes de alta carga y fuerte estacionalidad con sistemas que hoy son costosos, intensivos en energía y que desaprovechan el agua como recurso. La primera anualidad ha permitido caracterizar el efluente en las condiciones más exigentes y dimensionar un sistema piloto multietapa con dos niveles de calidad diferenciados.

Las próximas fases validarán el sistema en condiciones reales durante dos vendimias, cuantificarán su ventaja ambiental y económica frente a los fangos activados y estudiarán los tratamientos de afino necesarios para cerrar el ciclo del agua en la propia bodega. Con ello, FIVRA busca demostrar que las soluciones basadas en la naturaleza pueden contribuir a la competitividad del sector vitivinícola, al mismo tiempo que reducen su impacto ambiental y su presión sobre los recursos hídricos.

7. Agradecimientos

El Grupo Operativo FIVRA está cofinanciado por el Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (FEADER), el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación y el Gobierno de Aragón, en el marco del Plan Estratégico de la PAC 2023-2027 (Orden AGA/426/2026, de 23 de febrero).

8. Bibliografía

Charles, W., Fielden, R., Bahri, P. A., Ho, G., & Li, D. (2026). Developments in winery wastewater treatment and management. *Water, 18*(4), 504. https://doi.org/10.3390/w18040504

Flores, L., García, J., Pena, R., & Garfí, M. (2019). Constructed wetlands for winery wastewater treatment: A comparative life cycle assessment. *Science of the Total Environment, 659*, 1567–1576. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.348

Flores, L., García, J., Pena, R., & Garfí, M. (2020). Carbon footprint of constructed wetlands for winery wastewater treatment. *Ecological Engineering, 156*, 105959. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105959

Latessa, S. H., Hanley, L., & Tao, W. (2023). Characteristics and practical treatment technologies of winery wastewater: A review for wastewater management at small wineries. *Journal of Environmental Management, 342*, 118343. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118343

Marzo, A., Rezende Mudadu Silva, J., Masi, F., Rizzo, A., & Cirelli, G. L. (2025). A review of the full-scale constructed wetlands for the treatment and management of winery wastewater. *Current Opinion in Environmental Science & Health, 48*, 100680. https://doi.org/10.1016/j.coesh.2025.100680

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. (2026). *Información de mercados del sector vitivinícola (INFOVI): Enero 2026*. https://www.mapa.gob.es/dam/mapa/contenido/agricultura/temas/producciones-agricolas/vitivinicultura/infovi/ano-2026/informe-infovi-enero-2026.pdf

Pascual, A., Pena, R., Gómez-Cuervo, S., de la Varga, D., Álvarez, J. A., Soto, M., & Arias, C. A. (2021). Nature based solutions for winery wastewater valorisation. *Ecological Engineering, 169*, 106311. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106311

Real Decreto 1085/2024, de 22 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de reutilización del agua y se modifican diversos reales decretos que regulan la gestión del agua. *Boletín Oficial del Estado*, 256, 23 de octubre de 2024. https://www.boe.es/eli/es/rd/2024/10/22/1085

Reglamento (UE) 2020/741 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de mayo de 2020, relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua. *Diario Oficial de la Unión Europea*, L 177, 5 de junio de 2020.

Rizzo, A., Bresciani, R., Martinuzzi, N., & Masi, F. (2020). Online monitoring of a long-term full-scale constructed wetland for the treatment of winery wastewater in Italy. *Applied Sciences, 10*(2), 555. https://doi.org/10.3390/app10020555

Valderrama, C., Ribera, G., Bahí, N., Rovira, M., Giménez, T., Nomen, R., Lluch, S., Yuste, M., & Martínez-Lladó, M. (2012). Winery wastewater treatment for water reuse purpose: Conventional activated sludge versus membrane bioreactor (MBR): A comparative case study. *Desalination, 306*, 1–7. https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.08.016

CONAMA 2026