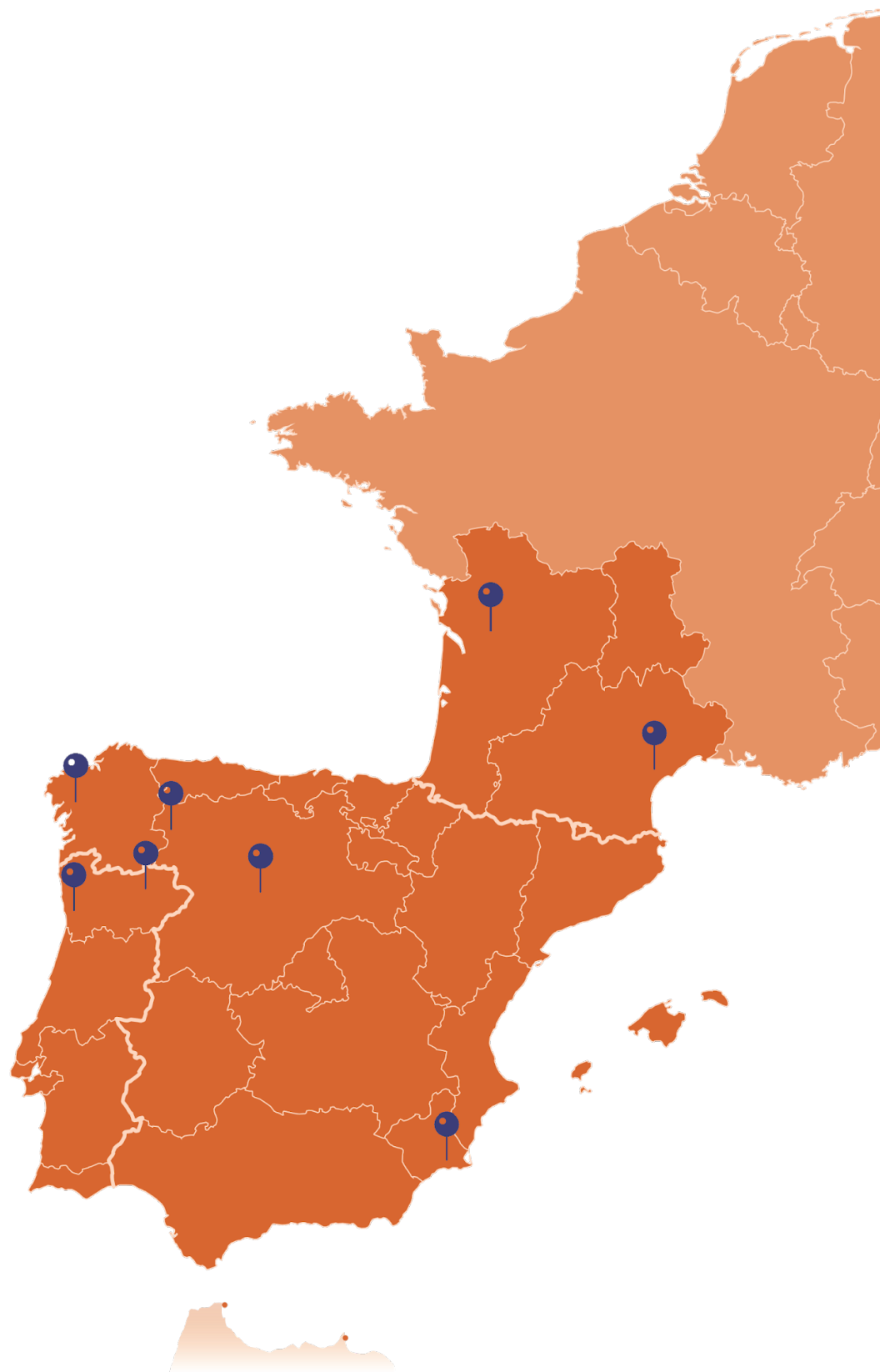




ENDORSE

E 1.5.1

Informe de identificación de
iniciativas innovadoras para la gestión
del fósforo



Cooperar está en tus manos



INFORMACIÓN DEL PROYECTO

Título del proyecto	Estrategia transnacional de recuperación de fósforo y su valorización como fertilizante
Acrónimo	ENDORSE
Programa	Interreg Sudoe VI-B 2021-2027, 2a convocatoria
Objetivo específico del Programa	Desarrollar y mejorar las capacidades de investigación e innovación y similar tecnologías avanzadas
Prioridad del Programa	2, Promover la cohesión social y el equilibrio territorial y demográfico en el SUDOE mediante la innovación y la transformación de los sectores productivos
Fecha de inicio - fin	01/06/2025 – 31/05/2028
Beneficiario principal	Fundación Centro Gallego de Investigaciones del agua

INFORMACIÓN DEL ENTREGABLE

Nº del Entregable	1.5.1
Nombre del Entregable	Informe de identificación de iniciativas innovadoras para la gestión del fósforo
Beneficiario principal	B4 Instituto Politécnico de Bragança Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Beneficiarios participantes	Todos los socios y asociados del proyecto
Grupo de trabajo	GT1
Actividad	A1.5 Identificación de iniciativas innovadoras de gestión de fósforo
Líder del GT	Asociación Empresarial Centro Tecnológico de la Energía y del Medio Ambiente de la Región de Murcia
Fecha de publicación	11/06/2026

Resumen

Este informe presenta un análisis integral de las iniciativas de recuperación y gestión sostenible del fósforo en la región SUDOE, basado en los resultados de un cuestionario aplicado a organizaciones de Portugal, España y Francia, complementado con una revisión documental y una búsqueda web especializada. El estudio caracteriza los proyectos identificados según su nivel de madurez tecnológica, fuentes de fósforo, productos recuperados, aplicaciones, beneficios ambientales y desafíos de implementación. Asimismo, proporciona una visión general del estado actual de la innovación en recuperación de fósforo en la región, destacando oportunidades para fortalecer la economía circular, la seguridad de los recursos y la sostenibilidad ambiental.

Índice

1. Resumen Ejecutivo	5
1.1. Introducción	5
1.2. Objetivos del cuestionario	5
2. Sección 1: Resultados – Información General	6
2.1. Organizaciones Participantes	6
2.2. Contactos de las Organizaciones	6
2.3. Distribución Geográfica	7
3. Sección 2: Resultados – Descripción de las Iniciativas	7
3.1. Resumen de las iniciativas identificadas	7
3.2. Tipo de iniciativas	8
3.3. Tipo de Entidad Promotora	8
3.4. Descripción detallada de las iniciativas	9
3.4.1. LIFE PHOS4EU (ACCIONA Water)	9
3.4.2. PHORWater (Calagua, University of Valencia)	9
3.4.3. LIFE ENRICH (Cetaqua)	9
3.4.4. Waste4Soil (IRTA)	9
3.4.5. Phos4You (NWE) (FPNCyL)	10
3.4.6. PULSE (Suez Environnement)	10
3.4.7. Phosphogreen (Suez)	10
3.4.8. Quinta da Acushla (Acushla)	10
4. Sección 3: Resultados – Flujos de Residuos y Fuentes de Fósforo	10
4.1 Tipos de Flujos de Residuos	10
4.2 Sector de Origen	11
5. Sección 4: Resultados – Estado de Desarrollo y Madurez	13
5.1 Nivel de Madurez Tecnológica	13
5.2 Condiciones Operacionales Reales	13
6. Sección 5: Resultados – Valorización Agrícola	15
6.1 Tipos de Productos	15
6.2 Tipos de Aplicación Agrícola	15
6.3 Datos de Rendimiento Agronómico	16
7. Sección 6: Resultados – Innovación, Impacto y Replicabilidad	17
7.1. Aspectos de Innovación de las Iniciativas	17
7.2. Beneficios Ambientales	17
7.3. Potencial de Replicabilidad	18
7.4. Barreras Identificadas	19
8. Proyectos de Recuperación de Fósforo Identificados mediante Búsqueda Web en la región SUDOE	21
8.1. Introducción	21
8.2. Alcance y Objetivos	21
8.3. Perspectiva General de Todos los Proyectos Identificados	22
8.4. Portugal: Proyectos de Recuperación de Fósforo	23
8.5. España: Proyectos de Recuperación de Fósforo	26

8.6. Francia: Proyectos de Recuperación de Fósforo	28
9. Catalogación y Visualización Geográfica de los Proyectos de Recuperación de Fósforo: Mapa Interactivo Power BI	32
9.1 Estructura del Catálogo de Proyectos	32
9.1.1 Modelo de Datos	32
9.1.2 Integración de los Datos en Power BI	33
9.2 Diseño y Funcionalidad del Mapa Interactivo	33
9.2.1 Visualización del Mapa	33
9.2.2 Filtros del Mapa	34
9.2.3 Tarjetas Interactivas de los Proyectos	34
10. Conclusión	35

1. Resumen Ejecutivo

Este informe presenta los resultados de un cuestionario integral diseñado para identificar y caracterizar iniciativas innovadoras de gestión del fósforo en la región SUDOE. La encuesta se realizó en marzo de 2026 y recopiló nueve respuestas de tres organizaciones que operan en España, Francia y Portugal.

El cuestionario identificó con éxito nueve iniciativas distintas de recuperación y gestión del fósforo, representando una cartera diversa de enfoques tecnológicos que abarcan desde la cristalización de estruvita y la recuperación de vivianita hasta la valorización de biosólidos y tecnologías avanzadas de adsorción. Una parte significativa de las iniciativas se sitúa en fases piloto o de demostración, principalmente entre TRL 5 y TRL 7, mientras que dos iniciativas se encuentran en niveles comerciales o precomerciales avanzados (TRL 8-9)

Los principales hallazgos revelan que los lodos de aguas residuales urbanas representan la principal fuente de fósforo (55,6% de las iniciativas), siendo el sector urbano responsable del 77,8% de todos los sectores de origen. La mayoría de las iniciativas (77,8%) han sido probadas en condiciones operativas reales en múltiples ubicaciones de España. El tipo de producto predominante es el fertilizante mineral recuperado (55,6%), siendo la agricultura convencional la principal aplicación objetivo (55,6%).

Los beneficios ambientales están fuertemente alineados con los principios de la economía circular (88,9% de las respuestas), y el potencial de replicación se evalúa como alto a medio en todas las iniciativas. Sin embargo, las barreras regulatorias (33,3%) y las limitaciones económicas (identificadas en múltiples respuestas) representan los desafíos más significativos para una implementación generalizada.

Este informe se amplió con un ejercicio integral de búsqueda web que permitió identificar y caracterizar 20 registros de proyectos adicionales de recuperación de fósforo en Portugal (8 proyectos), España (7 proyectos) y Francia (4 proyectos). Estos proyectos abarcan desde TRL 3 hasta TRL 9, incluyendo implementaciones a escala de investigación, demostración y comercial. Los proyectos identificados mediante la búsqueda web complementan los hallazgos del cuestionario y proporcionan una visión más amplia de las actividades de recuperación de fósforo en la región del sudoeste europeo.

1.1. Introducción

El fósforo es un nutriente esencial e irremplazable para todas las formas de vida y un insumo crítico para la producción mundial de alimentos. Sin embargo, la actual economía lineal del fósforo, caracterizada por la extracción de reservas finitas de roca fosfática, el uso ineficiente en la agricultura y las pérdidas hacia los cuerpos de agua enfrenta múltiples desafíos de sostenibilidad:

1. Escasez de recursos: La roca fosfática es un recurso no renovable con reservas geográficamente concentradas, lo que genera preocupaciones sobre la seguridad del suministro para regiones dependientes de importaciones, como la Unión Europea.
2. Degradación ambiental: Las pérdidas de fósforo provenientes de la agricultura y de los sistemas de aguas residuales provocan eutrofización de ecosistemas de agua dulce y marinos, amenazando la biodiversidad y la calidad del agua.
3. Vulnerabilidad económica: La volatilidad de los precios y los factores geopolíticos que afectan el suministro de roca fosfática generan riesgos económicos para el sector agrícola.
4. Imperativo de la economía circular: El Pacto Verde Europeo y el Plan de Acción para la Economía Circular identifican al fósforo como un material prioritario para su recuperación y reciclaje.

En respuesta a estos desafíos, un número creciente de iniciativas en toda Europa están desarrollando e implementando tecnologías para recuperar fósforo de corrientes de residuos, particularmente de aguas residuales urbanas, lodos de depuradora, estiércol animal y residuos agroindustriales, transformándolo en productos valiosos como fertilizantes y acondicionadores de suelo.

1.2. Objetivos del cuestionario

Este cuestionario fue diseñado para identificar y caracterizar sistemáticamente iniciativas innovadoras de gestión del fósforo que operan o son relevantes para la región SUDOE (España, sur de Francia y Portugal). Los objetivos específicos fueron:

1. Identificación: Mapear las iniciativas existentes de recuperación y gestión del fósforo en diferentes sectores y etapas de desarrollo.
2. Caracterización: Recopilar información técnica, operativa y estratégica detallada sobre cada iniciativa, incluyendo:
 - Tipo de tecnología y enfoque.
 - Fuente de fósforo y características de la corriente residual.
 - Etapa de desarrollo y nivel de madurez tecnológica.
 - Productos generados y aplicaciones agrícolas.

-
- Aspectos de innovación y beneficios ambientales.
 -
 - Barreras de implementación y potencial de replicabilidad.
 3. Análisis: Analizar los datos recopilados para identificar patrones, tendencias, brechas y oportunidades en el panorama de la recuperación del fósforo.
 4. Intercambio de conocimiento: Crear una base de información integral para apoyar la participación de las partes interesadas, el desarrollo de políticas, la transferencia tecnológica y las decisiones de inversión.

El cuestionario se estructuró en seis secciones que abarcan información general, descripciones de las iniciativas, corrientes residuales, etapa de desarrollo, valorización agrícola y aspectos relacionados con innovación, impacto y replicabilidad. Este informe presenta el análisis de las respuestas recibidas durante el período de recopilación de datos de marzo de 2026.

2. Sección 1: Resultados – Información General

2.1. Organizaciones Participantes

El cuestionario recibió respuestas de tres organizaciones activamente involucradas en iniciativas de recuperación y gestión del fósforo (Tabla 1):

Tabla 1: Organizaciones Participantes

Organización	Tipo	País	Número de iniciativas
Cetaqua	Centro tecnológico	España	6
Fundación Patrimonio Natural de Castilla y León (FPNCyL)	Fundación pública	España	2
Acushla	Empresa agroalimentaria	Portugal	1
TOTAL			9

Perfiles de las Organizaciones:

1. Cetaqua es un centro de investigación e innovación del agua con un fuerte enfoque en soluciones de economía circular para el sector hídrico. La organización reportó seis iniciativas que abarcan diferentes tipos de tecnologías y etapas de desarrollo, representando la cartera más amplia entre los participantes.
2. Fundación Patrimonio Natural de Castilla y León (FPNCyL) es una fundación pública dedicada a la conservación ambiental y a la gestión sostenible de recursos en la región de Castilla y León. La organización reportó dos iniciativas centradas en la recuperación de fósforo a partir de sistemas de aguas residuales.
3. Acushla es una empresa agrícola que opera en Portugal e implementa la recuperación de nutrientes a partir de residuos orgánicos mediante compostaje. La organización reportó una iniciativa a escala de demostración.

2.2. Contactos de las Organizaciones

Cada organización participante designó una persona de contacto responsable de proporcionar información y coordinar las actividades de seguimiento (Tabla 2):

Tabla 2: Contactos de las organizaciones

Organización	Persona de contacto	E-mail	Cargo
Cetaqua	Clara Reino	clara.reino@cetaqua.com	Coordinador técnico
FPNCyL	Lara Pelaz	Lara.Pelaz@patrimonionatural.org	Gestor de proyectos
Acushla	João Andrade	producao@acushla.com	Gestor de producción

2.3. Distribución Geográfica

Las iniciativas reportadas están distribuidas entre España y Portugal, con ubicaciones de implementación que abarcan múltiples regiones:

España:

- Castilla y León (múltiples iniciativas)
- Cataluña
- Murcia
- La Rioja
- Galicia

Portugal:

- Región Norte (Oporto, Miño)
- Región Central (Coímbra)
- Región Sur (Algarve, Alentejo)

3. Sección 2: Resultados – Descripción de las Iniciativas

3.1. Resumen de las iniciativas identificadas

El cuestionario identificó nueve iniciativas distintas de recuperación y gestión del fósforo (Tabla 3), representando una amplia diversidad de enfoques tecnológicos, etapas de desarrollo y contextos de implementación.

Tabla 3: Resumen de las iniciativas identificadas

Iniciativa	Organización	Tipo de Tecnología	Fuente	TRL	Estado
LIFE PHOS4EU	ACCIONA Water	Recuperación de vivianita (ViviMag®)	Lodos de aguas residuales	7	Demostración
PHORWater	Calagua (Univ. València)	Cristalización de estruvita	Aguas residuales	6	Piloto
LIFE ENRICH	Cetaqua	Recuperación integrada de N+P	Aguas residuales	5-7	Demostración
Waste4Soil	IRTA	Valorización orgánica	Residuos de la industria alimentaria	3-5	Investigación/Piloto
Struvia (Veolia)	Veolia Water	Cristalización de estruvita	Aguas residuales	8-9	Comercial
Phos4You (NWE)	FPNCyL	Múltiples tecnologías	Aguas residuales	5-7	Demostración
PULSE	Suez Environnement	Lixiviación ácida	Residuos de aguas residuales	5-6	Piloto
Phosphogreen	Suez	Cristalización de estruvita	Aguas residuales	8-9	Comercial
Quinta da Acushla	Acushla	Compostaje	Estiércol de oveja + residuos de almazara	5-6	Demostración

3.2. Tipo de iniciativas

Las iniciativas identificadas pueden clasificarse en varias familias tecnológicas, como se presenta en la Tabla 4:

1. Tecnologías de Precipitación Mineral (44,4%).
 - Cristalización de estruvita: Recuperación de fósforo en forma de fosfato de amonio y magnesio ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$), como fertilizante de liberación lenta. Representada por las iniciativas PHORWater, Struvia y Phosphogreen.
 - Recuperación de vivianita: Separación magnética de fosfato de hierro ($Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$) a partir de lodos, como se implementa en LIFE PHOS4EU.
2. Recuperación Integrada de Nutrientes (11,1%).
 - Recuperación combinada de N+P: LIFE ENRICH integra múltiples tecnologías para recuperar tanto nitrógeno como fósforo en formas de alto valor.
3. Extracción Química (11,1%).

- Lixiviación ácida: PULSE utiliza procesos de extracción selectiva para recuperar fósforo de matrices residuales complejas.
- 4. Valorización Biológica/Orgánica (22,2%).
- Compostaje: Quinta da Acushla transforma residuos orgánicos en compost rico en nutrientes.
- Enmiendas orgánicas: Waste4Soil valoriza residuos de la industria alimentaria en enmiendas para el suelo.
- 5. Plataformas Multi tecnológicas (11,1%).
- Demostración tecnológica: Phos4You prueba y compara múltiples enfoques de recuperación de fósforo.

3.3. Tipo de Entidad Promotora

Las iniciativas son promovidas por diversos tipos de organizaciones (Tabla 4), reflejando la naturaleza multiactor de la recuperación de fósforo.

Tabla 4: Entidad promotora

Entidad promotora	Número de iniciativas	Porcentaje	Ejemplos
Empresas de servicios/operadores de agua	3	33.3%	ACCIONA Water, Veolia, Suez
Instituciones de investigación/universidades	3	33.3%	Calagua, IRTA, Cetaqua
Fundaciones públicas/ambientales	2	22.2%	FPNCyL
Empresas agrícolas	1	11.1%	Acushla
TOTAL	9	100%	

Observaciones Clave:

1. Liderazgo del sector del agua: Las empresas y operadores del sector hídrico (33,3%) son los principales impulsores de la recuperación de fósforo, integrando tecnologías de recuperación en las infraestructuras de tratamiento de aguas residuales.
2. Colaboración entre investigación e industria: Las instituciones de investigación (33,3%) desempeñan un papel fundamental en el desarrollo y demostración de tecnologías, a menudo en colaboración con operadores industriales.
3. Participación del sector público: Las fundaciones ambientales (22,2%) facilitan proyectos de demostración y estrategias regionales de implementación.
4. Participación del sector agrícola: La participación directa del sector agrícola (11,1%) sigue siendo limitada, lo que sugiere oportunidades para una mayor integración de la cadena de valor.

3.4. Descripción detallada de las iniciativas

3.4.1. LIFE PHOS4EU (ACCIONA Water)

Tecnología: Recuperación de vivianita ViviMag® mediante separación magnética

TRL: 7 (Demostración)

Ubicación: Castilla y León, España

LIFE PHOS4EU demuestra la recuperación de fósforo a partir de lodos de aguas residuales utilizando la tecnología ViviMag®, que aprovecha las propiedades magnéticas de la vivianita (fosfato de hierro) para separarla de las matrices de lodos. La vivianita recuperada puede utilizarse directamente como fertilizante de liberación lenta o procesarse en otros productos de fósforo. La iniciativa se implementa a escala demostrativa en plantas de tratamiento de aguas residuales en Castilla y León.

3.4.2. PHORWater (Calagua, University of Valencia)

Tecnología: Cristalización de estruvita

TRL: 6 (Piloto)

Ubicación: Calahorra, La Rioja, España

PHORWater es un proyecto LIFE que desarrolla un modelo integrado de gestión para plantas de tratamiento de aguas residuales con el objetivo de mejorar la recuperación y reutilización de fósforo. La principal tecnología es la cristalización de estruvita, que precipita el fósforo en forma de fosfato de magnesio y amonio. El proyecto incluye pruebas a escala piloto y el desarrollo de protocolos operativos para su integración en infraestructuras existentes de tratamiento de aguas residuales.

3.4.3. LIFE ENRICH (Cetaqua)

Tecnología: Recuperación integrada de nitrógeno y fósforo

TRL: 5-7 (Piloto a Demostración)

Ubicación: Murcia, España

LIFE ENRICH integra múltiples tecnologías para recuperar tanto nitrógeno como fósforo de corrientes de aguas residuales y producir fertilizantes reciclados de alto valor. El proyecto se demuestra en plantas reales de tratamiento de aguas residuales y se centra en producir productos listos para el mercado que cumplan con los requisitos regulatorios y las necesidades de los agricultores. La iniciativa destaca los beneficios económicos y ambientales de la recuperación integrada de nutrientes.

3.4.4. Waste4Soil (IRTA)

Tecnología: Valorización de residuos de la industria alimentaria

TRL: 3-5 (Investigación a Piloto)

Ubicación: Cataluña, España

Waste4Soil es un proyecto Horizon Europe que valoriza residuos de la industria alimentaria para producir enmiendas de suelo ricas en nutrientes. El proyecto apoya la salud del suelo y la gestión circular de nutrientes mediante Living Labs que involucran a agricultores, procesadores de alimentos e investigadores. La recuperación de fósforo está integrada en estrategias más amplias de gestión de materia orgánica y nutrientes.

3.4.5. Phos4You (NWE) (FPNCyL)

Tecnología: Múltiples tecnologías de recuperación de fósforo

TRL: 5-7 (Piloto a Demostración)

Ubicación: Castilla y León, España (proyecto interregional)

Phos4You es un proyecto interregional que desarrolla y demuestra múltiples tecnologías de recuperación de fósforo en estaciones de tratamiento de aguas residuales en el noroeste de Europa. El proyecto incluye enfoques biológicos, químicos y fisicoquímicos, y tiene como objetivo identificar las tecnologías más adecuadas para diferentes contextos. FPNCyL coordina las actividades de demostración en Castilla y León.

3.4.6. PULSE (Suez Environnement)

Tecnología: Lixiviación ácida y extracción selectiva

TRL: 5-6 (Piloto)

PULSE es una tecnología piloto desarrollada dentro del proyecto Phos4You, basada en procesos de lixiviación ácida y extracción selectiva para recuperar fósforo de residuos de aguas residuales. La tecnología se dirige al fósforo ligado en matrices complejas y busca producir productos de fósforo de alta pureza adecuados para aplicaciones fertilizantes o químicas.

3.4.7. Phosphogreen (Suez)

Tecnología: Cristalización de estruvita

TRL: 8-9 (Comercial)

Ubicación: Villiers-Saint-Frédéric, Francia (tecnología desplegada internacionalmente)

Phosphogreen es un proceso industrial de recuperación de fósforo basado en la cristalización de estruvita, implementado a escala completa en plantas de tratamiento de aguas residuales. La tecnología produce fertilizantes comerciales y es comercializada por Suez como una solución probada para la recuperación de fósforo. Las instalaciones Phosphogreen operan en múltiples países, incluidas posibles aplicaciones en España y Portugal.

3.4.8. Quinta da Acushla (Acushla)

Tecnología: Compostaje

TRL: 5-6 (Demostración)

Ubicación: Lodões, Portugal

Quinta da Acushla implementa el compostaje de estiércol ovino y residuos de almazaras para producir enmiendas orgánicas ricas en nutrientes. La iniciativa demuestra la valorización de residuos agrícolas y agroindustriales a escala agrícola, cerrando ciclos locales de nutrientes y reduciendo la dependencia de fertilizantes externos. Los productos de compostaje se utilizan en agricultura ecológica.

4. Sección 3: Resultados – Flujos de Residuos y Fuentes de Fósforo

4.1 Tipos de Flujos de Residuos

Las iniciativas se dirigen a diferentes corrientes residuales como fuentes de fósforo, presentadas en la Tabla 5:

Tabla 5: Corrientes residuales.

Corriente residual	Número de iniciativas	Porcentaje	Ejemplos
Lodos de aguas residuales urbanas	5	55.6%	LIFE PHOS4EU, PHORWater, LIFE
Aguas residuales	2	22.2%	PULSE, Phos4You
Residuos de la industria alimentaria	1	11.1%	Waste4Soil
Residuos agrícolas (estiércol + agroindustriales)	1	11.1%	Agricultural residues (manure + agro-industrial)
TOTAL	9	100%	

Hallazgos clave:

1. Predominio de lodos de aguas residuales urbanas: Más de la mitad (55,6%) de las iniciativas se centra en la recuperación de fósforo a partir de lodos de depuradora, lo que refleja la alta concentración de fósforo en esta corriente y los factores regulatorios asociados a la gestión de lodos.
2. Recuperación en fase líquida: Dos iniciativas (22,2%) se centran en el fósforo presente en la fase líquida de las aguas residuales, lo que requiere enfoques tecnológicos diferentes (generalmente precipitación o cristalización).
3. Valorización de residuos orgánicos: Dos iniciativas (22,2%) se centran en residuos orgánicos procedentes de la agricultura y la industria alimentaria, representando fuentes alternativas de fósforo fuera del ciclo urbano del agua.
4. Gradiente de concentración: La distribución refleja un enfoque estratégico en corrientes de alta concentración (lodos), donde la recuperación es más económicamente viable, al tiempo que se exploran corrientes de menor concentración (aguas residuales líquidas) y residuos orgánicos.

4.2 Sector de Origen

Las corrientes residuales provienen de diferentes sectores económicos (Tabla 6)

Tabla 6: Sectores económicos.

Sector	Número de iniciativas	Porcentaje
Urbano (tratamiento de aguas residuales)	7	77.8%
Industria alimentaria	1	11.1%
Agricultura	1	11.1%
TOTAL	9	100%

El claro predominio del sector urbano (77,8%) refleja varios factores:

1. Factores regulatorios: Las normativas de la UE y nacionales exigen cada vez más la eliminación del fósforo de las aguas residuales, lo que crea incentivos para su recuperación en lugar de su eliminación.
2. Disponibilidad de infraestructuras: Las plantas de tratamiento de aguas residuales existentes proporcionan puntos de recogida centralizados e infraestructura técnica para implementar tecnologías de recuperación.
3. Concentración de fósforo: Las aguas residuales urbanas y los lodos contienen concentraciones significativas de fósforo, lo que hace que su recuperación sea económicamente viable.
4. Capacidad institucional: Las empresas de servicios de agua cuentan con experiencia técnica y capacidad de inversión para implementar tecnologías de recuperación.
5. La representación limitada de los sectores agrícola (11,1%) y de la industria alimentaria (11,1%) sugiere un importante potencial sin explotar para la recuperación de fósforo a partir de estas fuentes, que en conjunto contienen flujos sustanciales de fósforo.

5. Sección 4: Resultados – Estado de Desarrollo y Madurez

5.1 Nivel de Madurez Tecnológica

El Nivel de Madurez Tecnológica (TRL, Tabla 7) es una métrica sistemática para evaluar la madurez de las tecnologías, que va desde TRL 1 (principios básicos observados) hasta TRL 9 (sistema real probado en entorno operativo).

Tabla 7: Nivel de Madurez Tecnológica

Rango de TRL	Nivel	Número de iniciativas	Porcentaje
TRL 3-5	De investigación a piloto	2	22.2%
TRL 5-6	De piloto a demostración	4	44.4%
TRL 6-7	Demostración	1	11.1%
TRL 8-9	Comercial	2	22.2%
TOTAL		9	100%

Hallazgos clave:

1. Predominio de fases piloto y de demostración: La mayoría de las iniciativas (77,8%) se encuentran entre TRL 5-7, lo que indica una transición activa de la investigación al despliegue comercial. Esta etapa es crítica para validar el rendimiento técnico, la viabilidad económica y la integración operativa.
2. Madurez comercial: Dos iniciativas (22,2%) han alcanzado madurez comercial (TRL 8-9), demostrando que las tecnologías de recuperación de fósforo pueden lograr operaciones a escala completa y rentables. Ambas iniciativas comerciales utilizan tecnología de cristalización de estruvita (Struvia y Phosphogreen).
3. Tubería de investigación: Dos iniciativas (22,2%) se encuentran en etapas tempranas (TRL 3-5), lo que garantiza una cartera de tecnologías y enfoques emergentes.

4. Brecha de validación tecnológica: La concentración en TRL 5-7 sugiere que muchas tecnologías enfrentan desafíos en la transición de la demostración a la implementación comercial, a menudo relacionados con la viabilidad económica, la aprobación regulatoria y el desarrollo del mercado. Principales resultados:

5.2 Condiciones Operacionales Reales

La alta proporción de iniciativas probadas en condiciones operativas reales (77,8%) indica un fuerte énfasis en la validación práctica y la preparación para la implementación (Tabla 8). Las pruebas en condiciones reales son esenciales para:

- Validar el rendimiento con composición variable del sustrato de alimentación.
- Demostrar la fiabilidad operativa y la robustez del sistema.
- Identificar desafíos de integración con infraestructuras existentes.
- Generar datos para la evaluación económica y ambiental.
- Aumentar la confianza entre los posibles adoptantes.

Tabla 8: Condiciones operacionales.

Condiciones operacionales	Número de iniciativas	Porcentaje
Probado en condiciones reales	7	77.8%
Aún no probado en condiciones reales	2	22.2%
TOTAL	9	100%

6. Sección 5: Resultados – Valorización Agrícola

6.1 Tipos de Productos

Las iniciativas producen diferentes tipos de productos que contienen fósforo (Tabla 9):

Tabla 9: Tipos de productos.

Tipo de producto	Número de iniciativas	Porcentaje	Ejemplos
Fertilizante mineral recuperado	5	55.6%	Estruvita, vivianita
Enmienda orgánica/compost	2	22.2%	Compost, enmiendas orgánicas para el suelo
Productos nutricionales integrados	1	11.1%	Fertilizantes combinados de N+P
Varios tipos de productos	1	11.1%	Diversas formas según la tecnología
TOTAL	9	100%	

Características de los productos:

1. Fertilizantes minerales recuperados (55,6%). Los fertilizantes minerales recuperados a partir de aguas residuales incluyen:
 - Estruvita ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$): fertilizante de liberación lenta que contiene fósforo, nitrógeno y magnesio. Producido por PHORWater, Struvia y Phosphogreen. La estruvita presenta baja solubilidad en agua, reduciendo la lixiviación de nutrientes y proporcionando liberación sostenida.
 - Vivianita ($Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$): fosfato de hierro con propiedades de liberación lenta. Producido por LIFE PHOS4EU mediante tecnología de separación magnética.
2. Enmiendas orgánicas (22,2%). Los productos orgánicos incluyen:

- Compost: producido por Quinta da Acushla a partir de estiércol ovino y residuos de almazaras. Aporta fósforo y materia orgánica, mejorando la estructura del suelo y la actividad biológica.
- Enmiendas orgánicas del suelo: producidas por Waste4Soil a partir de residuos de la industria alimentaria. Combinan el suministro de nutrientes con beneficios para la salud del suelo.

Productos con nutrientes integrados (11,1%):

- LIFE ENRICH produce fertilizantes combinados de nitrógeno y fósforo, optimizando las proporciones de nutrientes para cultivos específicos y reduciendo la necesidad de múltiples aplicaciones de fertilizantes.

6.2 Tipos de Aplicación Agrícola

Observaciones clave resumidas en la Tabla 10:

1. Enfoque en la agricultura convencional: La mayoría de las iniciativas (55,6%) se dirige a la agricultura convencional, lo que refleja el gran tamaño del mercado y los canales de distribución establecidos.
2. Potencial de la agricultura ecológica: Dos iniciativas (22,2%) están específicamente orientadas a la agricultura ecológica, donde los productos recuperados pueden tener ventajas debido a los requisitos de certificación orgánica y a la preferencia de los agricultores por insumos naturales.
3. Aplicaciones flexibles: Dos iniciativas (22,2%) producen productos adecuados tanto para sistemas convencionales como ecológicos, lo que maximiza el potencial de mercado.

Tabla 10: Tipos de aplicaciones agrícolas.

Aplicación	Número de iniciativas	Porcentaje
Agricultura convencional	5	55.6%
Agricultura ecológica	2	22.2%
Aplicaciones múltiples/flexibles	2	22.2%
TOTAL	9	100%

6.3 Datos de Rendimiento Agronómico

Los datos de rendimiento agronómico se presentan en la Tabla 11, seguidos del análisis correspondiente:

1. Disponibilidad de datos: Menos de la mitad de las iniciativas (44,4%) ha completado estudios de validación agronómica, lo que representa una brecha significativa en la base de evidencia sobre el rendimiento de los productos.
2. Validación en curso: Un tercio de las iniciativas (33,3%) está realizando ensayos agronómicos, lo que indica el reconocimiento de la importancia de los datos de rendimiento para la aceptación en el mercado.
3. Brecha de datos: Dos iniciativas (22,2%) aún no han iniciado la validación agronómica, probablemente debido a etapas tempranas de desarrollo o a un enfoque en aspectos técnicos más que agronómicos.

Tabla 11: Información agronómica.

Información agronómica	Número de iniciativas	Porcentaje
Datos agronómicos disponibles	4	44.4%
Datos agronómicos en desarrollo.	3	33.3%

Los datos agronómicos aún no están disponibles.	2	22.2%
TOTAL	9	100%

Los datos de rendimiento agronómico son fundamentales para:

- Aprobación regulatoria y certificación de productos.
- Confianza de los agricultores y aceptación del mercado.
- Optimización de las dosis y métodos de aplicación.
- Comparación con fertilizantes convencionales.
- Demostración de los beneficios ambientales.

La disponibilidad limitada de datos agronómicos representa una barrera para el desarrollo del mercado y debería priorizarse en futuras actividades de desarrollo.

7. Sección 6: Resultados – Innovación, Impacto y Replicabilidad

7.1. Aspectos de Innovación de las Iniciativas

Las iniciativas demuestran innovación en múltiples dimensiones (Tabla 12):

Tabla 12: Aspectos de innovación de las iniciativas

Dimensión	Número de iniciativas	Porcentaje	Ejemplos
Tecnología/proceso novedoso	6	66.7%	ViviMag®, extracción PULSE, recuperación integrada
Integración con la infraestructura existente	5	55.6%	Soluciones de modernización para EDAR
Innovación de productos	4	44.4%	Nuevas formas de fertilizantes, productos combinados N+P
Innovación en modelos de negocio	3	33.3%	Cadenas de valor de economía circular
Colaboración entre múltiples partes interesadas	4	44.4%	Alianzas intersectoriales

Nota: Las iniciativas pueden mostrar múltiples dimensiones de innovación; los porcentajes no suman 100%.

Principales temas de innovación:

1. Innovación tecnológica (66,7%). Las tecnologías innovadoras incluyen:
 - Separación magnética de vivianita (LIFE PHOS4EU).
 - Lixiviación ácida selectiva (PULSE).
 - Recuperación integrada de múltiples nutrientes (LIFE ENRICH).
 - Control avanzado de cristalización (Struvia, Phosphogreen).
2. Innovación de integración (55,6%).
 - Muchas iniciativas se centran en la integración de tecnologías de recuperación en infraestructuras existentes de tratamiento de aguas residuales, minimizando la inversión de capital y las interrupciones operativas. Este enfoque de “retrofit” acelera el despliegue al aprovechar activos existentes.
3. Innovación de producto (44,4%). Las innovaciones de producto incluyen:
 - Nuevas formas de fertilizantes (vivianita, estruvita).
 - Relaciones de nutrientes optimizadas (productos combinados N+P).
 - Productos orgánicos certificados a partir de corrientes residuales.

4. Innovación colaborativa (44,4%). Varias iniciativas muestran asociaciones innovadoras entre múltiples actores:

- Empresas de agua + instituciones de investigación + agricultores.
- Colaboraciones europeas transfronterizas.
- Asociaciones público-privadas.

7.2. Beneficios Ambientales

Un resumen de los datos analizados sobre beneficios ambientales se presenta en la Tabla 13:

Tabla 13: Beneficios ambientales.

Beneficios ambientales	Número de iniciativas	Porcentaje
Economía circular/recuperación de recursos	8	88.9%
Reducción de la eutrofización	7	77.8%
Reducción del impacto de la minería	6	66.7%
Mitigación del cambio climático	5	55.6%
Reducción de residuos	6	66.7%

Nota: Las iniciativas suelen proporcionar múltiples beneficios ambientales; los porcentajes no suman 100%.

Análisis:

1. Economía circular (88,9%). Casi todas las iniciativas contribuyen a los objetivos de la economía circular mediante:

- Transformación de residuos en recursos
- Cierre de ciclos de nutrientes
- Reducción de flujos lineales de recursos
- Creación de valor a partir de corrientes residuales

2. Reducción de la eutrofización (77,8%). La recuperación de fósforo reduce la descarga de nutrientes en cuerpos de agua, mitigando:

- Floraciones de algas.
- Depleción de oxígeno.
- Pérdida de biodiversidad.
- Degradación de la calidad del agua.

3. Reducción del impacto de la minería (66,7%). El fósforo recuperado sustituye la roca fosfática extraída, reduciendo:

- Destrucción de hábitats por la minería.
- Consumo de energía en la extracción y procesamiento.
- Contaminación por metales pesados (cadmio).
- Riesgos geopolíticos de suministro.

4. Mitigación climática (55,6%). Los beneficios climáticos incluyen:

- Reducción del consumo energético (frente a la minería y procesamiento de roca fosfática).
- Emisiones evitadas de metano (por descomposición de residuos orgánicos).
- Secuestro de carbono (en enmiendas orgánicas).
- Reducción de emisiones en la producción de fertilizantes.

5. Reducción de residuos (66,7%). Las tecnologías de recuperación reducen los volúmenes de residuos que requieren eliminación, disminuyendo:

- Uso de vertederos.
- Incineración.
- Emisiones del transporte.
- Costes de eliminación.

7.3. Potencial de Replicabilidad

Los resultados de la evaluación del potencial de replicabilidad se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14: Evaluación del potencial de replicabilidad

Potencial de replicabilidad	Número de iniciativas	Porcentaje
Alto	4	44.4%
Medio	5	55.6%
Bajo	0	0%
TOTAL	9	100%

Factores que apoyan la replicación:

1. Alto potencial de replicación (44,4%):

- Tecnologías comerciales probadas (Struvia, Phosphogreen).
- Procesos estandarizados aplicables a muchas plantas de tratamiento de aguas residuales (EDAR).
- Propuesta de valor económica clara.
- Cadenas de suministro establecidas

2. Potencial de replicación medio (55,6%)

- Tecnologías en fase de demostración que requieren mayor validación.
- Aplicaciones específicas de contexto (por ejemplo, tipos específicos de corrientes residuales).
- Barreras regulatorias o de mercado por superar.
- Necesidad de adaptación a condiciones locales

3. Bajo potencial de replicación

- La ausencia de iniciativas evaluadas con bajo potencial de replicación indica que todas las tecnologías identificadas cuentan con vías viables hacia una implementación más amplia, siempre que reciban el apoyo adecuado.

4. Oportunidades de replicación geográfica:

- Todas las iniciativas tienen potencial de replicación en España, Portugal y otros países de la UE con sistemas similares de:
- Infraestructuras de tratamiento de aguas residuales.
- Sistemas agrícolas.
- Marcos regulatorios.

7.4. Barreras Identificadas

Las barreras identificadas por los encuestados se presentan en la Tabla 15:

Tabla 15: Barreras identificadas.

Tipo de barreras	Número de iniciativas	Porcentaje	Problemas
Normativa/legal	3	33.3%	Aprobación de productos, clasificación de residuos, normativa sobre fertilizantes
Económica/financiera	5	55.6%	Costos de inversión, costos operativos, precios de mercado, subsidios

Técnica	2	22.2%	Retos de la producción a gran escala, optimización de procesos, variabilidad de la materia prima
Mercado/aceptación	4	44.4%	Sensibilización de los agricultores, distribución de productos, competencia con los fertilizantes convencionales.
Organizacional	2	22.2%	Coordinación entre las partes interesadas, capacidad institucional

Nota: Las iniciativas suelen enfrentar múltiples barreras; los porcentajes no suman 100%.

Análisis detallado de barreras:

1. Barreras económicas/financieras (55,6%). Los desafíos económicos incluyen:

- Altos costes de capital: inversión en infraestructura de recuperación, especialmente en aplicaciones de retrofit.
- Costes operativos: energía, productos químicos, mano de obra y mantenimiento.
- Competencia de precios de mercado: los productos recuperados compiten con fertilizantes convencionales de bajo coste.
- Flujos de ingresos inciertos: fluctuación de precios de fertilizantes y demanda inestable.
- Falta de incentivos financieros: subsidios o instrumentos económicos limitados para apoyar la recuperación.

2. Barreras de mercado/aceptación (44,4%). Los desafíos de mercado incluyen:

- Conciencia de los agricultores: conocimiento limitado sobre productos recuperados.
- Percepción de calidad: escepticismo sobre el rendimiento frente a fertilizantes convencionales.
- Infraestructura de distribución: falta de canales establecidos para productos recuperados.
- Pequeños volúmenes de mercado: dificultad para alcanzar economías de escala.
- Requisitos de certificación: necesidad de pruebas y aprobación de productos.

3. Barreras regulatorias/legales (33,3%). Los desafíos regulatorios incluyen:

- Clasificación del producto: incertidumbre sobre si los materiales recuperados son "residuo" o "producto".
- Regulación de fertilizantes: procesos complejos de aprobación de nuevos tipos de fertilizantes.
- Límites de contaminantes: normas estrictas para metales pesados y contaminantes orgánicos.
- Comercio transfronterizo: barreras para la comercialización entre países de la EU.
- Responsabilidad legal: incertidumbre sobre la responsabilidad de la calidad y seguridad del producto.

4. Barreras técnicas (22,2%). Los desafíos técnicos incluyen:

- Variabilidad del sustrato: fluctuaciones en la concentración y composición del fósforo.
- Optimización de procesos: necesidad de ajustes para maximizar la eficiencia de recuperación.
- Riesgos de escalado: dificultades en la transición de piloto a escala industrial.
- Complejidad de integración: dificultad para integrar la recuperación en procesos existentes de tratamiento

5. Barreras organizativas (22,2%). Los desafíos organizativos incluyen:

- Coordinación multi-actor: dificultad para alinear intereses de operadores de agua, agricultores, reguladores y tecnología.
- Capacidad institucional: conocimiento limitado sobre tecnologías de recuperación.
- Aversión al riesgo: reticencia a invertir en tecnologías no probadas.
- Cadenas de valor fragmentadas: falta de sistemas integrados entre recuperación y uso agrícola.

8. Proyectos de Recuperación de Fósforo Identificados mediante Búsqueda Web en la región SUDOE

8.1. Introducción

Esta sección presenta los resultados de un ejercicio integral de búsqueda web realizado para identificar proyectos de recuperación de fósforo en funcionamiento en Portugal, España y Francia. La búsqueda web complementa la encuesta basada en cuestionarios presentada, proporcionando una visión más amplia del panorama de las actividades de recuperación de fósforo en el suroeste europeo.

El ejercicio de búsqueda web incluyó búsquedas sistemáticas en:

- Bases de datos de proyectos de la Comisión Europea (LIFE, Horizon Europe, Interreg).
- Bases de datos nacionales de investigación e innovación.
- Literatura académica y técnica.
- Sitios web de empresas y proveedores tecnológicos.
- Publicaciones de empresas de agua y organizaciones ambientales.
- Informes de agencias de desarrollo regional.

Los términos de búsqueda incluyeron combinaciones de: recuperación de fósforo, recuperación de nutrientes, estruvita, vivianita, aguas residuales, lodos, economía circular, fertilizante, Portugal, España, Francia y términos técnicos relacionados en inglés, español, portugués y francés.

8.2. Alcance y Objetivos

La búsqueda web tuvo como objetivos:

1. Identificar proyectos de recuperación de fósforo en los tres países objetivo.
2. Caracterizar los proyectos según ubicación, organización, tipo de tecnología y nivel de madurez.
3. Proporcionar un inventario integral de las actividades de recuperación de fósforo en la región.
4. Identificar patrones, tendencias y brechas en el panorama regional de recuperación de fósforo.
5. Complementar los resultados de la encuesta con una cobertura geográfica y tecnológica más amplia.

Recopilación y Validación de Datos. Para cada proyecto identificado, se recopiló la siguiente información:

- País y ubicación específica.
- Título del proyecto.
- Organización líder o promotora.
- Objetivo principal y enfoque tecnológico.
- Nivel de Madurez Tecnológica (TRL)

La información fue validada cruzadamente entre múltiples fuentes siempre que fue posible para garantizar su precisión. Los proyectos se incluyeron si cumplían los siguientes criterios:

- Enfoque en recuperación de fósforo o recuperación de nutrientes que incluyera fósforo.
- Operación o implementación planificada en la región SUDOE (Portugal, España y Francia).
- Información pública suficiente para caracterizar el proyecto

Los proyectos identificados mediante búsqueda web incluyen algunas iniciativas también identificadas a través del cuestionario, así como proyectos adicionales no captados por la encuesta. Esta superposición proporciona validación de los resultados del cuestionario mientras amplía el inventario general.

Limitaciones

La búsqueda web presenta limitaciones inherentes:

- Dependencia de información públicamente disponible, que puede estar incompleta o desactualizada.
- Posible sesgo hacia proyectos más grandes y más difundidos.
- Dificultad para acceder a información sobre proyectos propietarios o confidenciales.
- Barreras lingüísticas para proyectos documentados principalmente en idiomas locales.
- Variación en la calidad y detalle de la información entre proyectos

A pesar de estas limitaciones, la búsqueda web proporciona datos complementarios valiosos a los resultados del cuestionario y ofrece una visión integral de las actividades de recuperación de fósforo en la región.

8.3. Perspectiva General de Todos los Proyectos Identificados

El ejercicio de búsqueda web identificó 20 proyectos de recuperación de fósforo (Tabla 16) en Portugal (8 proyectos), España (7 proyectos) y Francia (4 proyectos); la distribución geográfica se presenta en la Tabla 18. Un proyecto (Waste4Soil) opera en múltiples países y se contabiliza tanto en España como en Francia.

Tabla 16: Visión General de todos los proyectos identificados.

No.	País	Localización	Proyecto	Organización	TRL
1	Portugal	Porto	LIPOR	LIPOR	6
2	Portugal	Faro	WATER-MINING (Faro)	Águas do Algarve	7
3	Portugal	Porto	Green Fertilizers	FEUP (LSRE-LCM)	3-4
4	Portugal	Universidade do Minho	BIOECONORTE	Universidade do Minho	3-4
5	España	Universidad de Sevilla	P-TRAP	FERTIBERIA	3 - 5
6	Portugal	Coimbra	University of Coimbra	Universidade de Coimbra	4-6
7	Portugal	Portalegre	VALORIZA	IP Portalegre	4-6
8	Portugal	Lodões	Quinta da Acushla	Acushla	5-6
9	España	Castilla y León	LIFE PHOS4EU	ACCIONA Water	7
10	España	Calahorra (La Rioja)	PHORWater	Univ. València (Calagua)	6
11	España	Murcia	LIFE ENRICH	Cetaqua	5-7
12	España	Cataluña	Waste4Soil	IRTA	3-5
13	Francia	Saint-Maurice Cedex	Struvia (Veolia)	Veolia Water	8-9
14	España	Cuenca del Río Duero	LIFE-IP DUERO	FPNCyL	5-6
15	España	Santiago de Compostela	ENDORSE	CETAQUA	5-6
16	España	Castilla y León	Phos4You (NWE)	FPNCyL	5-7
17	Francia	Francia / UE	PULSE	Suez Environment	5-6
18	Francia	Villiers-Saint-Frédéric	Phosphogreen	Suez	8-9
19	Francia	Francia / UE	Waste4Soil	ANIA	3-5
20	Portugal	Universidad de Lisboa	LEX4BIO	Consortio LEX4BIO	5-7

8.4. Portugal: Proyectos de Recuperación de Fósforo

Portugal cuenta con 8 proyectos identificados de recuperación de fósforo, que abarcan fases de investigación, demostración y piloto. Los proyectos están distribuidos en grandes centros urbanos (Oporto, Faro, Coímbra, Lisboa) y ubicaciones regionales (Portalegre,

Lodões), lo que refleja tanto infraestructuras urbanas de tratamiento de aguas residuales como aplicaciones agrícolas y agroindustriales (Tabla 17).

Tabla 17: Portugal - Visión general detallada de los proyectos.

Proyecto	Localización	Organización	TRL	Objetivo
LIPOR	Porto	LIPOR	6	Recuperación de fósforo y nitrógeno a partir de residuos orgánicos mediante digestión anaeróbica, produciendo fertilizantes reciclados y bioproductos dentro de un marco de economía circular.
WATER-MINING (Faro)	Faro	Águas do Algarve	7	Demostración de la recuperación de nutrientes y biopolímeros (Kaumera®) a partir de lodos de depuradora en la planta de tratamiento de aguas residuales de Faro-Olhão, lo que permite la recuperación de recursos a partir de aguas residuales urbanas.
Green Fertilizers	Porto	FEUP (LSRE-LCM)	3-4	Desarrollo de fertilizantes sostenibles mediante cristalización y otras vías de recuperación de nutrientes a partir de aguas residuales y corrientes residuales.
BIOECONORTE	Universidade do Minho	Universidade do Minho	3-4	Promoción de soluciones de bioeconomía circular para la recuperación de nutrientes, incluido el fósforo, a partir de efluentes agroindustriales y residuos orgánicos en el norte de Portugal.
University of Coimbra	Coimbra	Universidade de Coimbra	4-6	Recuperación electroquímica de nutrientes, incluido el fosfato, de corrientes de aguas residuales urbanas, con validación a escala piloto.
VALORIZA	Portalegre	IP Portalegre	4-6	Valorización de los recursos endógenos, incluidos los lodos y los residuos orgánicos, para apoyar las estrategias de economía circular en la región del Alentejo.
LEX4BIO	Universidade de Lisboa	Consorcio LEX4BIO	5-7	Evaluación de la seguridad, el desempeño agronómico y la aceptación regulatoria de los fertilizantes de base biológica producidos a partir de nitrógeno y fósforo reciclados.
Quinta da Acushla	Lodões	Acushla	5-6	Compostaje de estiércol de oveja y residuos de almazara para producir enmiendas orgánicas ricas en nutrientes para uso agrícola.

Los proyectos portugueses demuestran una significativa diversidad tecnológica, abarcando:

1. **Tecnologías de Recuperación Mineral:** Los proyectos WATER-MINING y Green Fertilizers se enfocan en enfoques basados en la cristalización (estruvita y otras formas minerales) para recuperar fósforo de corrientes líquidas y sólidas de aguas residuales.
2. **Recuperación Electroquímica:** El proyecto de la Universidade de Coimbra representa un enfoque electroquímico innovador para la recuperación de nutrientes, ofreciendo ventajas potenciales en eficiencia energética y pureza del producto.
3. **Valorización Biológica y Orgánica:** LIPOR, BIOECONORTE y Quinta da Acushla se enfocan en procesos biológicos (digestión anaerobia, compostaje) para recuperar nutrientes de flujos de residuos orgánicos, produciendo enmiendas orgánicas y fertilizantes de base biológica.
4. **Enfoques Integrados:** El P-TRAP aborda la contaminación difusa por fósforo proveniente de la escorrentía agrícola y de los sistemas de suelo, complementando la recuperación puntual a partir de aguas residuales.
5. **Desarrollo Regulatorio y de Mercado:** El LEX4BIO se concentra en el desafío crítico de la aceptación regulatoria y del desarrollo de mercado para fertilizantes de base biológica, abordando una barrera clave para la comercialización.
6. **Ecosistema Institucional:** El panorama portugués de la recuperación de fósforo se caracteriza por un fuerte liderazgo académico, con universidades (Oporto, Minho, Coímbra, Lisboa) desempeñando roles centrales en el desarrollo y validación de tecnologías. Esto refleja la capacidad de investigación de Portugal en las áreas de ingeniería ambiental y economía circular.

Las entidades gestoras de agua (Águas do Algarve, LIPOR) están activamente involucradas en proyectos de demostración, integrando tecnologías de recuperación en infraestructuras operacionales de tratamiento de aguas residuales. Este involucramiento es fundamental para la transición de las tecnologías del laboratorio a las aplicaciones reales.

Las instituciones de desarrollo regional (IP Portalegre) y las empresas agrícolas (Acushla) representan partes interesadas (stakeholders) emergentes en la recuperación de fósforo, particularmente en la valorización de residuos orgánicos en contextos rurales y agrícolas.

Nivel de Madurez (TRL): Los proyectos portugueses abarcan una amplia gama de TRL (3–7), con concentración en las fases piloto y de demostración (TRL 4–7). Esta distribución indica:

- **Cartera activa de investigación:** Proyectos en TRL 3–4 (Green Fertilizers, BIOECONORTE) garantizan innovación continua y desarrollo de tecnologías de nueva generación.
- **Preparación para la demostración:** Múltiples proyectos en TRL 5–7 (WATER-MINING, LEX4BIO, Quinta da Acushla) están validando tecnologías en condiciones reales y preparándose para la implementación comercial.
- **Brecha de comercialización:** La ausencia de proyectos en fase comercial (TRL 8–9) en Portugal sugiere que las tecnologías enfrentan desafíos en la transición de la demostración a la operación comercial a escala total, probablemente relacionados con la viabilidad económica, la aprobación regulatoria y el desarrollo de mercado.

Cobertura Geográfica y Sectorial: Los proyectos se concentran en grandes centros urbanos (Oporto, Faro, Coímbra, Lisboa), donde se ubican infraestructuras de tratamiento de aguas residuales e instituciones de investigación. Sin embargo, los proyectos en Portalegre y Lodões demuestran una actividad emergente en regiones rurales y agrícolas, reflejando el potencial para la recuperación descentralizada de nutrientes a escala agrícola.

Los proyectos portugueses se dirigen a diversas fuentes de fósforo:

- Aguas residuales urbanas y lodos de depuradora (WATER-MINING, Green Fertilizers, Universidade de Coimbra).
- Biorresiduos y residuos orgánicos municipales (LIPOR).
- Efluentes agroindustriales (BIOECONORTE).
- Residuos agrícolas (Quinta da Acushla, P-TRAP).

Esta diversidad refleja el reconocimiento de que la recuperación de fósforo debe abordar múltiples flujos de residuos para lograr un impacto significativo en la economía circular.

Alineación Política: Las actividades portuguesas de recuperación de fósforo están alineadas con las prioridades nacionales y de la UE:

- **Estrategia de Economía Circular:** Todos los proyectos contribuyen a los objetivos de economía circular al transformar residuos en recursos.
- **Directiva Marco del Agua:** Las tecnologías de recuperación apoyan los requisitos de eliminación de nutrientes en el tratamiento de aguas residuales.
- **Desarrollo de la Bioeconomía:** Los proyectos enfocados en fertilizantes de base biológica se alinean con las estrategias de bioeconomía.
- **Desarrollo Regional:** Los proyectos en el Alentejo y el Norte de Portugal apoyan el desarrollo económico regional y la eficiencia de los recursos.

Desafíos y Oportunidades: Los principales desafíos para los proyectos portugueses incluyen:

- Escalamiento y comercialización: transición de proyectos piloto y de demostración a escala comercial.
- Viabilidad económica: lograr competitividad de costos frente a los fertilizantes convencionales.
- Marcos regulatorios: lidiar con procesos complejos de aprobación de nuevos fertilizantes.
- Desarrollo de mercado: aumentar la concienciación de los agricultores y desarrollar canales de distribución.

Las oportunidades incluyen:

- Fuerte base de investigación: El conocimiento académico proporciona la base para la innovación continua.
- Involucramiento de los operadores del agua: La participación del sector del agua facilita la implementación en condiciones reales.
- Financiación europea: El acceso a los programas LIFE, Horizon Europe e Interreg apoya el desarrollo de proyectos.
- Demanda agrícola: El creciente interés en fertilizantes sostenibles crea oportunidades de mercado.

8.5. España: Proyectos de Recuperación de Fósforo

España cuenta con 7 proyectos identificados de recuperación de fósforo (Tabla 18), que representan una combinación de iniciativas en fase de demostración y tecnologías comerciales. Los proyectos españoles demuestran un fuerte involucramiento de utilities de agua, instituciones de investigación y proveedores de tecnología, con especial concentración en las regiones de Castilla y León, Cataluña y Murcia.

Tabla 18: España - Visión general detallada de los proyectos.

Proyecto	Localización	Organización	TRL	Objetivo
LIFE PHOS4EU	Castilla y León	ACCIONA Water	7	Recuperación de fósforo a partir de lodos de aguas residuales mediante la tecnología ViviMag®, que separa la vivianita a través de procesos magnéticos para su reutilización como fertilizante.
PHORWater	Calahorra (La Rioja)	Univ. Valencia (Calagua)	6	Desarrollo de un modelo de gestión integrada para plantas de tratamiento de aguas residuales con el fin de mejorar la recuperación y reutilización del fósforo, principalmente a través de la cristalización de estruvita.
LIFE ENRICH	Murcia	Cetaqua	5-7	Integración de tecnologías de recuperación de nitrógeno y fósforo para producir fertilizantes reciclados de alto valor, demostrada en plantas de tratamiento de aguas residuales reales.
Waste4Soil	Cataluña	IRTA	3-5	Valorización de los residuos de la industria alimentaria para producir enmiendas de suelo ricas en nutrientes, apoyando la salud del suelo y la gestión circular de nutrientes a través de laboratorios vivientes.
LIFE-IP DUERO	Cuenca del río Duero (Castilla y León)	FPNCyL	5-6	Proyecto integral integrado para la implementación del Plan de Gestión de Cuencas Hidrográficas en toda la región española del Duero, incluyendo estrategias de gestión y recuperación del fósforo.
ENDORSE	Santiago de Compostela	CETAQUA	5-6	Introducción de una innovadora precipitación en cascada de múltiples sales de fósforo y su

Proyecto	Localización	Organización	TRL	Objetivo
				aplicación inteligente para mejorar la biodisponibilidad de nutrientes y reducir el impacto ambiental, con acciones piloto en España, Portugal y Francia.

Los proyectos españoles demuestran liderazgo tecnológico en la recuperación de fósforo, particularmente en:

1. Recuperación de Vivianita: El LIFE PHOS4EU presenta la innovadora tecnología ViviMag®, desarrollada por ACCIONA Water, que utiliza separación magnética para recuperar vivianita (fosfato de hierro) a partir de lodos de depuradora. Esta tecnología representa un avance significativo en comparación con la cristalización convencional de estruvita, ofreciendo ventajas potenciales en eficiencia de recuperación y calidad del producto.
2. Cristalización de Estruvita: El PHORWater demuestra tecnologías maduras de cristalización de estruvita a escalas de demostración y comercial, respectivamente.
3. Recuperación Integrada de Nutrientes: El LIFE ENRICH representa un enfoque avanzado que integra múltiples tecnologías para recuperar simultáneamente nitrógeno y fósforo, optimizando las proporciones de nutrientes y el valor del producto.
4. Precipitación en Cascada: El ENDORSE introduce una innovadora precipitación en cascada de múltiples sales de fósforo, mejorando potencialmente la eficiencia de recuperación y la diversidad de productos en comparación con los enfoques de producto único.

Ecosistema Institucional: El ecosistema español de recuperación de fósforo involucra a diversos stakeholders:

- Utilities de Agua: ACCIONA Water y Veolia Water son importantes proveedores de tecnología y operadores, aportando experiencia comercial y capacidad operacional.
- Instituciones de Investigación: Universidades (Valencia) y centros de investigación (IRTA, Cetaqua) proporcionan conocimiento científico y capacidad de innovación.
- Fundaciones Ambientales: La FPNCyL coordina iniciativas regionales y a escala de cuencas hidrográficas relacionadas con la gestión de fósforo, integrando la recuperación en estrategias ambientales más amplias.

Este ecosistema multi-stakeholder facilita el desarrollo, demostración y comercialización de tecnologías a través de capacidades complementarias.

Nivel de Madurez (TRL): Los proyectos españoles presentan un perfil de desarrollo maduro:

- Demostración Avanzada: El LIFE PHOS4EU (TRL 7) se encuentra en una fase avanzada de demostración, preparándose para la implementación comercial.
- Piloto/Demostración Activa: Varios proyectos (PHORWater, LIFE ENRICH, LIFE-IP DUERO, ENDORSE) en TRL 5-7 están validando tecnologías y modelos de negocio.
- Pipeline de Investigación: El Waste4Soil (TRL 3-5) asegura la innovación continua en la valorización de residuos orgánicos.

La presencia de tecnologías en fase comercial distingue a España de Portugal y Francia en este conjunto de datos, indicando un desarrollo de mercado más avanzado. Cobertura Geográfica y Sectorial: Los proyectos españoles demuestran una amplia cobertura geográfica:

- Castilla y León: Múltiples proyectos (LIFE PHOS4EU, LIFE-IP DUERO) reflejan un fuerte compromiso regional con la recuperación de fósforo, apoyado por la FPNCyL.
- Regiones Mediterráneas: Proyectos en Murcia, La Rioja y Cataluña abordan la recuperación de fósforo en regiones con escasez hídrica, donde la gestión de nutrientes es crítica para la calidad del agua.
- Galicia: El ENDORSE, en Santiago de Compostela, expande la recuperación de fósforo al noroeste de España.

La cobertura sectorial incluye:

- Tratamiento de aguas residuales urbanas (LIFE PHOS4EU, PHORWater, LIFE ENRICH, Struvia).
- Gestión de cuencas hidrográficas (LIFE-IP DUERO).
- Residuos de la industria alimentaria (Waste4Soil).

Integración con la Gestión del Agua: Varios proyectos españoles integran la recuperación de fósforo con objetivos más amplios de gestión del agua:

- El LIFE-IP DUERO integra la recuperación de fósforo en una gestión integral de cuencas hidrográficas, abordando tanto fuentes puntuales como difusas.

- El PHORWater desarrolla modelos integrados de gestión para EDARs, optimizando la recuperación de fósforo en conjunto con otros objetivos de tratamiento.
- El ENDORSE se enfoca en la aplicación inteligente de fósforo recuperado para maximizar los beneficios agronómicos y minimizar los impactos ambientales.

Esta integración refleja el reconocimiento de que la recuperación de fósforo debe estar inserta en estrategias holísticas de gestión del agua y de los nutrientes.

Participación en Programas de la UE: España demuestra un fuerte compromiso con el programa LIFE de la UE, con cuatro proyectos (LIFE PHOS4EU, LIFE ENRICH, LIFE-IP DUERO, ENDORSE) financiados por LIFE. Esto refleja:

- Fuerte capacidad de desarrollo de proyectos.
- Alineación con las prioridades ambientales de la UE.
- Capacidad de aprovechar la financiación europea para la demostración e implementación.
- Liderazgo en colaboración transnacional.

Desafíos y Oportunidades: Los principales desafíos incluyen:

- Competitividad económica: alcanzar la paridad de costos con los fertilizantes convencionales en mercados agrícolas competitivos.
- Armonización regulatoria: lidiar con diferentes regulaciones regionales para productos recuperados.
- Fragmentación del mercado: desarrollar canales de distribución en diversas regiones agrícolas.
- Selección tecnológica: elegir tecnologías óptimas para diferentes contextos y sustratos.

Las oportunidades incluyen:

- Fuerte apoyo institucional: apoyo regional y nacional a la economía circular y la calidad del agua.
- Demanda agrícola: el gran sector agrícola crea un potencial de mercado significativo.
- Exportación de tecnología: las tecnologías y el conocimiento español pueden exportarse a otros mercados de la UE y globales.

8.6. Francia: Proyectos de Recuperación de Fósforo

Francia cuenta con 4 proyectos identificados de recuperación de fósforo (Tabla 19) en este conjunto de datos, que representan una combinación de actividades de investigación, demostración y comerciales. Los proyectos franceses demuestran un fuerte involucramiento de grandes utilities de agua (Suez, Veolia) y participación en iniciativas europeas transnacionales.

Tabla 19: Francia - Visión general detallada de los proyectos.

Proyecto	Localización	Organización	TRL	Objetivo
PULSE	Francia/UE	Suez Environment	5-6	Tecnología piloto basada en procesos de lixiviación ácida y extracción selectiva para recuperar fósforo de lodos de aguas residuales.
Phosphogreen	Villiers-Saint-Frédéric	Suez	8-9	Proceso industrial de recuperación de fósforo basado en la cristalización de estruvita, implementado a gran escala en plantas de tratamiento de aguas residuales para producir fertilizantes comerciales.
Waste4Soil	Francia / UE	ANIA	3-5	La participación francesa en un proyecto europeo se centra en la recuperación de nutrientes de los residuos del sistema alimentario para crear enmiendas de suelo sostenibles y apoyar modelos de bioeconomía circular.

Los proyectos franceses demuestran un fuerte liderazgo tecnológico comercial a través de:

1. Phosphogreen (Suez): Esta tecnología de cristalización de estruvita a escala comercial (TRL 8-9) representa una de las tecnologías de recuperación de fósforo más maduras a nivel global. Las instalaciones Phosphogreen operan en varios países, produciendo fertilizantes listos para el mercado y generando ingresos a partir del fósforo recuperado. El éxito comercial de la tecnología demuestra que la recuperación de fósforo puede ser económicamente viable a gran escala.
2. Ecosistema de Proveedores de Tecnología: Las grandes utilities francesas de agua (Suez, Veolia) son líderes globales en el desarrollo e implementación de tecnologías de recuperación de fósforo. Su involucramiento aporta:
 - Inversión significativa en I+D.
 - Experiencia operacional global.
 - Competencia comercial y acceso al mercado.
 - Capacidad financiera para el escalamiento tecnológico.

Los proyectos franceses demuestran una fuerte colaboración transnacional:

3. Waste4Soil: La participación francesa en este proyecto Horizon Europe conecta a las partes interesadas de la industria alimentaria francesa con socios europeos, promoviendo enfoques de economía circular para los residuos de los sistemas alimentarios.
4. PULSE: Desarrollado en colaboración con la Universidad de Lieja (Bélgica), este proyecto ejemplifica la colaboración transfronteriza en investigación.

La colaboración transnacional proporciona:

- Acceso a conocimientos y tecnologías diversas.
- Intercambio de financiación y riesgos.
- Mayores oportunidades de mercado.
- Armonización de enfoques entre regiones.

A pesar del menor número de proyectos, las iniciativas francesas abarcan enfoques tecnológicos diversificados:

- Cristalización de Estruvita (Phosphogreen): Tecnología madura y probada para la recuperación mineral de fósforo.
- Lixiviación Ácida (PULSE): Enfoque avanzado de extracción química para recuperar fósforo de matrices complejas.
- Valorización Orgánica (Waste4Soil): Recuperación de nutrientes a partir de residuos de los sistemas alimentarios.

Esta diversidad refleja el enfoque integral de Francia para la recuperación de fósforo en diferentes sustratos y aplicaciones.

Nivel de Madurez (TRL): Los proyectos franceses presentan una distribución bimodal:

- Madurez Comercial: El Phosphogreen (TRL 8-9) representa una tecnología comercial probada.
- Investigación: El Waste4Soil (TRL 3-5) explora enfoques emergentes para la valorización de residuos alimentarios.

La coexistencia de proyectos en fase de investigación y de proyectos ya comercializados pone de manifiesto una cadena de innovación completa, que abarca desde la concepción y el desarrollo de nuevas soluciones hasta su introducción en el mercado. En términos de cobertura sectorial, los proyectos franceses se concentran principalmente en dos sectores:

- Aguas Residuales Urbanas: Phosphogreen y PULSE se enfocan en la recuperación de fósforo en EDARs municipales, aprovechando infraestructuras existentes y factores regulatorios.
- Industria Alimentaria: Waste4Soil aborda la recuperación de nutrientes de los residuos de los sistemas alimentarios, representando un enfoque complementario importante a la recuperación basada en aguas residuales.

Este doble enfoque refleja el reconocimiento de que una recuperación integral de fósforo exige actuar sobre múltiples flujos residuales.

- Alineación Política: Las actividades francesas de recuperación de fósforo se alinean con las estrategias nacionales y de la UE:
- Hoja de Ruta para la Economía Circular: La estrategia nacional francesa de economía circular prioriza la recuperación de nutrientes y la valorización de residuos.
- Objetivos de Calidad del Agua: La recuperación de fósforo apoya la implementación de la Directiva Marco del Agua y la reducción de la eutrofización.
- Transición Agrícola: Los productos de fósforo recuperado apoyan la transición agrícola francesa hacia una gestión sostenible de nutrientes.
- Materias Primas Críticas: La recuperación de fósforo contribuye a los objetivos de seguridad de materias primas críticas de la UE.

Desafíos y Oportunidades: Los principales desafíos incluyen:

-
- Desarrollo de mercado: aumentar la aceptación por parte de los agricultores y desarrollar canales de distribución para productos recuperados.
 - Complejidad regulatoria: lidiar con regulaciones de fertilizantes y procesos de aprobación.
 - Viabilidad económica: alcanzar la rentabilidad en mercados competitivos de fertilizantes.
 - Selección tecnológica: identificar tecnologías ideales para diferentes contextos.

Las oportunidades incluyen:

- Momento comercial: las tecnologías comerciales probadas atraen inversión y demuestran viabilidad.
- Liderazgo de las utilities: las grandes utilities de agua proporcionan capacidad técnica y financiera para la implementación.
- Mercado agrícola: el gran sector agrícola crea una demanda significativa de fertilizantes sostenibles.
- Apoyo político: fuerte apoyo nacional y europeo a la economía circular y la recuperación de nutrientes.
- Exportación de tecnología: las tecnologías y los conocimientos franceses pueden exportarse globalmente.

9. Catalogación y Visualización Geográfica de los Proyectos de Recuperación de Fósforo: Mapa Interactivo Power BI

Tras la identificación exhaustiva de las iniciativas de gestión de fósforo a través de la encuesta basada en cuestionarios y del ejercicio de búsqueda web, la catalogación sistemática y la visualización geográfica de todos los proyectos identificados en un cuadro de mando (dashboard) interactivo en Power BI. Esta actividad de catalogación sirve a múltiples objetivos estratégicos:

- Inteligencia espacial: Permitir la identificación geográfica y el mapeo de los proyectos de recuperación de fósforo en la región SUDOE.
- Integración de datos: Consolidar información de los proyectos proveniente de múltiples fuentes en una base de datos unificada y estructurada.
- Apoyo a la decisión: Proporcionar a los stakeholders herramientas interactivas para explorar la distribución de los proyectos, tipos de tecnología, niveles de madurez y actores institucionales.
- Análisis de brechas: Identificar brechas geográficas y tecnológicas para orientar futuras prioridades de investigación, desarrollo e inversión.
- Facilitación de la colaboración: Apoyar la identificación de socios potenciales e iniciativas complementarias para la cooperación transnacional.

El cuadro de mando en Power BI transforma los datos cualitativos y cuantitativos recopilados en una plataforma interactiva de inteligencia visual, permitiendo la exploración dinámica del panorama de la recuperación de fósforo. Esta herramienta está diseñada para apoyar a responsables políticos, instituciones de investigación, utilities de agua, organizaciones agrícolas y agencias de financiación en la planificación estratégica, la transferencia de tecnología y el desarrollo colaborativo de proyectos.

9.1 Estructura del Catálogo de Proyectos

9.1.1 Modelo de Datos

El mapeo de los proyectos está estructurado como una base de datos relacional con los siguientes campos principales para cada proyecto identificado:

1. Identificación del proyecto:

- Nombre del proyecto: Título oficial o designación de la iniciativa.
- País: País principal de implementación (Portugal, España, Francia).
- Ubicación: Ciudad, región o instalación específica donde se implementa o coordina el proyecto.
- Organización: Institución líder o entidad promotora (operadora de agua, institución de investigación, empresa tecnológica, fundación ambiental, etc.).

2. Caracterización técnica:

- Nivel de Madurez Tecnológica (TRL): Etapa de madurez en la escala de 1–9 (TRL 1–2: investigación básica; TRL 3–4: investigación aplicada; TRL 5–6: piloto/demostración; TRL 7–8: precomercial; TRL 9: implementación comercial).
- Tipo de tecnología: Enfoque técnico principal (cristalización de estruvita, recuperación de vivianita, extracción electroquímica, valorización de biosólidos, precipitación en cascada, lixiviación ácida, adsorción, compostaje, gestión integrada de nutrientes).
- Fuente de fósforo: Origen del sustrato rico en fósforo (aguas residuales urbanas, lodos de depuradora, efluentes agroindustriales, estiércol ganadero, residuos de la industria alimentaria, biorresiduos, contaminación difusa).

Los mapas incluyen tarjetas que facilitan la identificación de la información clave, tal como.

- Objetivo principal: Objetivo primario del proyecto (recuperación de nutrientes, producción de fertilizantes, mejora de la calidad del agua, demostración de economía circular, validación tecnológica, implementación de políticas, etc.).
- Fuente de financiación: Programas de la UE (LIFE, Horizon Europe, Interreg), programas nacionales de investigación, inversión privada o financiación mixta.
- Duración del proyecto: Fechas de inicio y fin (cuando estén disponibles).
- Ámbito geográfico: Local, regional, nacional o transnacional.

9.1.2 Integración de los Datos en Power BI

El catálogo estructurado alimenta el modelo de datos de Power BI a través de la siguiente arquitectura:

1. Capa de datos de origen: Archivo CSV que contiene los 20 proyectos con la información completa de los campos.
2. Capa de transformación de datos: Procesos de Power Query para la limpieza, estandarización y enriquecimiento de los datos (por ejemplo, extracción de valores numéricos de TRL, categorización de tipos de tecnología, geocodificación de ubicaciones).
3. Capa del modelo de datos: Tablas relacionales que vinculan los proyectos con entidades geográficas (países, regiones, ciudades), categorías tecnológicas y tipos organizacionales.
4. Capa de visualización: Mapa interactivo, filtros, gráficos y tarjetas de proyectos que consultan dinámicamente el modelo de datos.

Esta arquitectura permite una exploración flexible del panorama de los proyectos a través de múltiples dimensiones analíticas (geográfica, tecnológica, institucional, temporal), manteniendo simultáneamente la integridad de los datos y la trazabilidad de la información de origen.

9.2 Diseño y Funcionalidad del Mapa Interactivo

9.2.1 Visualización del Mapa

El elemento central del cuadro de mando en Power BI es un mapa geográfico interactivo que presenta los 20 proyectos catalogados como marcadores de ubicación en la región SUDOE. Tal como se ejemplifica en la Figura 1, el mapa utiliza los siguientes principios de diseño:

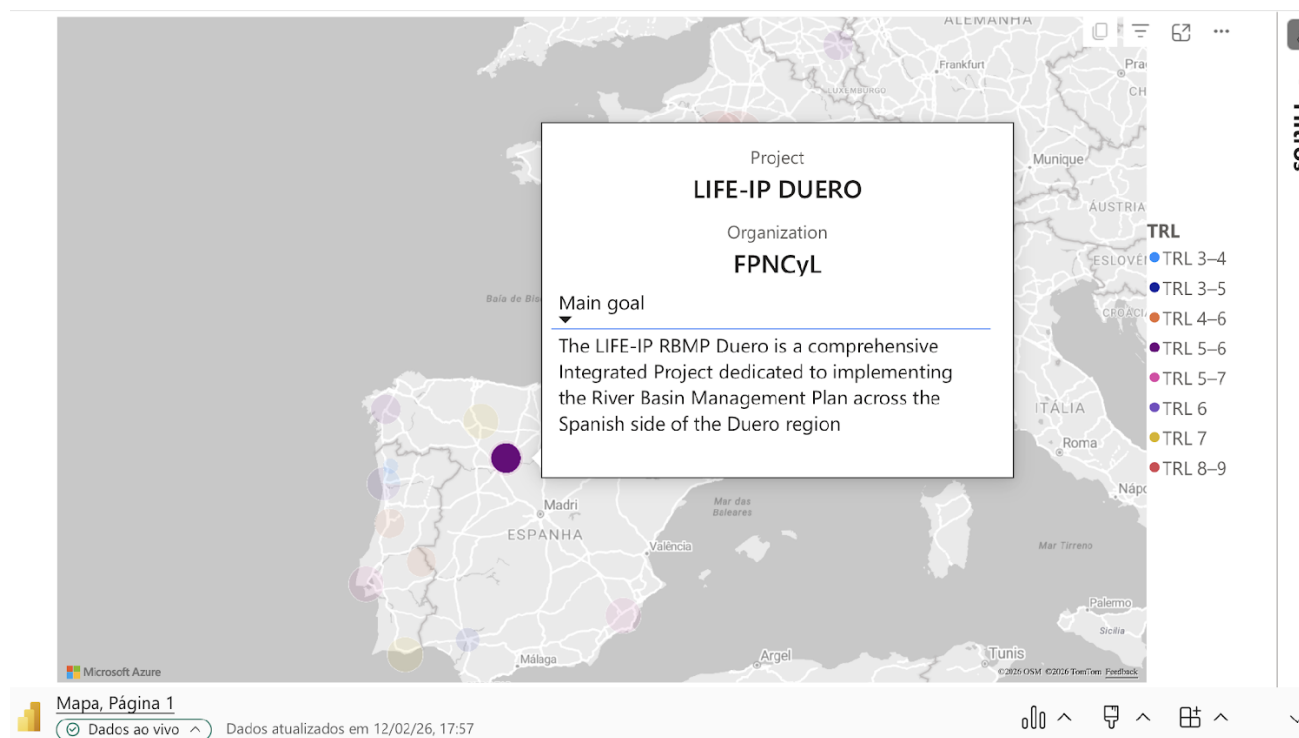


Figura 1: Mapa Interactivo en Power BI: Identificación de los Proyectos.

Mapa base: Mapa geográfico estándar del suroeste de Europa, con fronteras de los países, principales ciudades y elementos hidrográficos visibles para proporcionar contexto espacial.

Marcadores de los proyectos: Cada proyecto está representado por un marcador circular posicionado en el lugar de su implementación. El tamaño del marcador es proporcional al TRL (marcadores más grandes indican mayor madurez), y el color representa el tipo de tecnología (por ejemplo, azul para cristalización de estruvita, verde para valorización de biosólidos, naranja para métodos electroquímicos y púrpura para enfoques integrados).

Agrupamiento (Clustering): Cuando varios proyectos se encuentran en proximidad geográfica, los marcadores se agrupan con un indicador numérico que muestra el número de proyectos. Los usuarios pueden ampliar el mapa para desagregar los grupos y visualizar los proyectos individuales.

9.2.2 Filtros del Mapa

El cuadro de mando dispone de múltiples controles de filtro que actualizan dinámicamente el mapa y las visualizaciones asociadas (Figura 2):

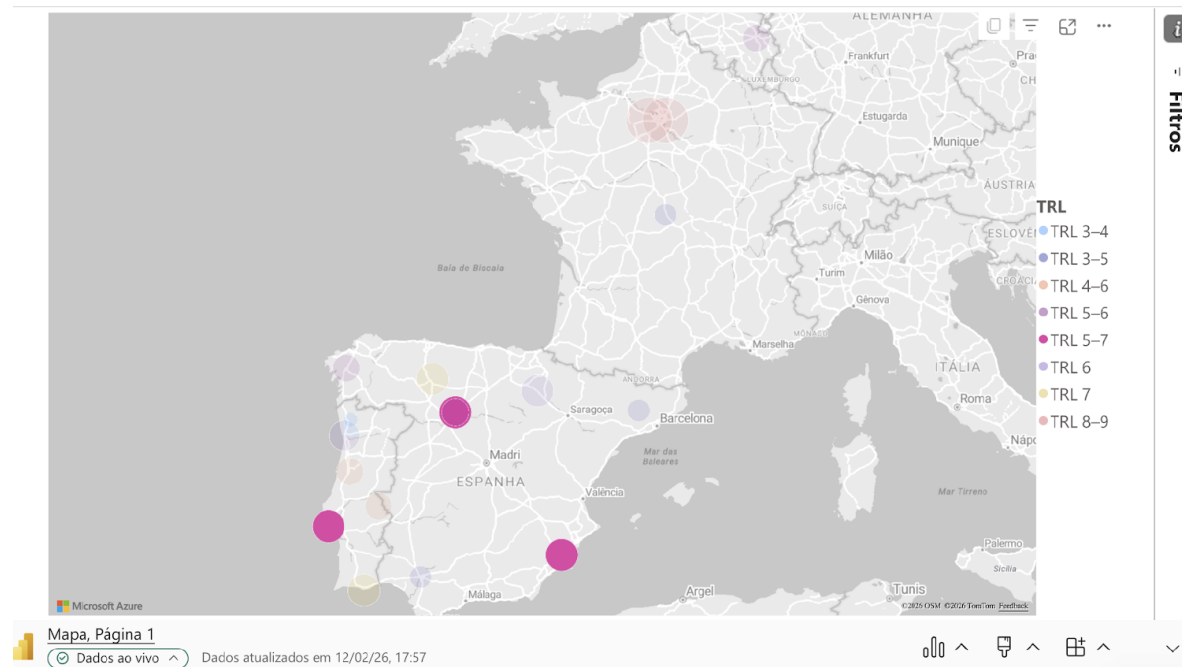


Figura 2: Mapa Interactivo en Power BI: Agrupamiento por caracterización técnica.

Filtro por país: Menú desplegable de selección múltiple que permite a los usuarios visualizar proyectos de Portugal, España, Francia o cualquier combinación de estos países. Esto posibilita análisis específicos por país o comparaciones entre ellos.

Filtro por TRL: Barra deslizante de intervalo o filtro de selección múltiple que permite a los usuarios enfocarse en etapas específicas de madurez:

- Fase de investigación (TRL 3-4).
- Fase de piloto/demostración (TRL 5-6).
- Fase precomercial/comercial (TRL 7-9).

Filtro por tipo de tecnología: Menú desplegable de selección múltiple para filtrar por enfoque técnico (cristalización de estruvita, recuperación de vivianita, extracción electroquímica, valorización de biosólidos, precipitación en cascada, compostaje, gestión integrada de nutrientes, etc.).

Filtro por tipo de organización: Filtro categórico que distingue entre utilities de agua, instituciones de investigación, empresas tecnológicas, fundaciones ambientales y agencias públicas.

Filtro por fuente de fósforo: Filtro de selección múltiple para el tipo de sustrato (aguas residuales urbanas, lodos de depuradora, efluentes agroindustriales, estiércol ganadero, residuos de la industria alimentaria, biorresiduos).

Todos los filtros están interconectados: al seleccionar un valor en un filtro, el mapa, los indicadores del número de proyectos y las estadísticas resumidas se actualizan en tiempo real, permitiendo una exploración rápida de subconjuntos específicos de proyectos.

9.2.3 Tarjetas Interactivas de los Proyectos

Al hacer clic en un marcador de proyecto o seleccionar un proyecto en la vista de lista, se abre una tarjeta detallada del proyecto que presenta información exhaustiva:

- Cabecera: Nombre del proyecto, bandera del país y distintivo (badge) de TRL.
- Organización: Institución líder con logotipo (cuando esté disponible).
- Ubicación: Ciudad/región con coordenadas geográficas.
- Tecnología: Descripción detallada del enfoque técnico.
- Fuente de fósforo: Tipo de sustrato y sector de origen.
- Objetivo principal: Objetivos principales y resultados esperados.
- Estado: Fase actual de desarrollo y principales hitos.

Las tarjetas de los proyectos proporcionan el contexto detallado necesario para la implicación de los stakeholders, la exploración de alianzas o la evaluación de la transferencia de tecnología.

10. Conclusión

La catalogación sistemática y la visualización geográfica de los proyectos de recuperación de fósforo demuestran el elevado valor estratégico de integrar información técnica, territorial e institucional para apoyar la transición hacia una economía circular de los nutrientes en la región SUDOE. El mapa interactivo desarrollado en Power BI transforma información dispersa en conocimiento accesible y accionable, permitiendo a las diferentes partes interesadas comprender el estado actual de la innovación, identificar patrones geográficos y tecnológicos, detectar oportunidades de colaboración y respaldar procesos de toma de decisiones basados en evidencias.

El análisis realizado pone de manifiesto un ecosistema dinámico y diverso de recuperación de fósforo en el suroeste de Europa, con 20 proyectos identificados que abarcan distintos niveles de madurez tecnológica, desde la investigación aplicada y la demostración hasta soluciones ya implementadas a escala comercial. Portugal y España destacan por su intensa actividad en investigación, desarrollo y demostración tecnológica, mientras que Francia presenta ejemplos relevantes de tecnologías cercanas a la plena madurez comercial, demostrando el potencial de escalabilidad de estas soluciones.

Los resultados también revelan la existencia de importantes polos de innovación en regiones como Oporto, Castilla y León y Cataluña, lo que refleja la creciente importancia de la recuperación de nutrientes como estrategia para reducir la dependencia de materias primas críticas, reforzar la seguridad del suministro y minimizar los impactos ambientales asociados a la gestión de residuos y aguas residuales.

A pesar de los avances identificados, persisten desafíos significativos relacionados con la armonización normativa, la viabilidad económica de las tecnologías, la transferencia de conocimiento entre regiones, la participación de los usuarios finales y la creación de cadenas de valor capaces de integrar eficazmente los nutrientes recuperados en el sector agrícola. El fortalecimiento de la cooperación transnacional, el incremento de las inversiones en proyectos de demostración e implementación industrial y una participación más activa de los diferentes actores serán fundamentales para acelerar la adopción de estas soluciones.

El conjunto de evidencias obtenidas mediante la consulta a las partes interesadas, el análisis sistemático de iniciativas y proyectos y la caracterización espacial de las actividades de recuperación de fósforo proporciona una visión amplia y multidimensional del panorama actual de la región SUDOE. Este enfoque integrado permite no solo comprender el grado de desarrollo del sector, sino también identificar prioridades estratégicas para la investigación, la innovación y las políticas públicas.

Por último, el mapa interactivo constituye mucho más que una herramienta de visualización: representa una plataforma de apoyo para el seguimiento continuo, la evaluación de los avances y la planificación estratégica. A medida que surjan nuevos proyectos y las tecnologías existentes evolucionen hacia niveles superiores de madurez, esta herramienta podrá seguir apoyando a la comunidad SUDOE en la construcción de sistemas de gestión del fósforo más resilientes, circulares y sostenibles, contribuyendo a que la región desempeñe un papel de referencia en la transición europea hacia una gestión eficiente de los nutrientes y la economía circular.



**Interreg
Sudoe**



Co-funded by
the European Union

ENDORSE